

EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS USANDO PERFILES DE RESISTIVIDAD  
ELÉCTRICA EN LOS MIEMBROS SUPERIORES DE LA FORMACIÓN RIONEGRO  
ENTRE EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE MÁLAGA (SANTANDER) Y EL RÍO  
SERVITÁ

María Paula Bohórquez Díaz y Britney Yenielt Hernández Fajardo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geóloga

Director

Yesid Paul Goyes Peñafiel

Geólogo, PhD (c)

Codirector

Luis Eduardo Moreno Torres

Ingeniero Civil Esp.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

**Dedicatoria**

*A mi madre Gladys Díaz, por todo su amor, por ser el pilar más importante  
y el ejemplo más grande a seguir en mi vida.*

*A mi hermana Luisa Bohórquez por su amor y su apoyo incondicional.*

*A mis compañeros y colegas Jesús Díez y Margarita Sierra por acompañarme y ser mi  
apoyo a lo largo de todo el pregrado, y con quienes he vivido momentos que recordaré siempre.*

**- María Paula Bohórquez Díaz**

*A mí por ser mi mayor compañía.*

*A mis padres Dora y Ricardo por ser mi mayor soporte y mi ejemplo de vida.*

*A mis hermanos Yurly, Wilmer y Anggie por ser mis primeros amigos y por mostrarme  
que hay mucho más allá de lo que se cree.*

*A mi cuñado Andrés por sacarme siempre una sonrisa, y a mi sobrino Andrés David por  
poder ser un ejemplo para ti.*

*A mis amigos Liz, Loli, Camila, Pau, Sofi y Sebas por motivarme y estar para mí en cada  
paso que doy.*

*A BLAT por ser todo lo que está bien en una amistad, por ustedes la vida universitaria  
fue más bonita.*

*Y a la vida por ponerme en el lugar en el que debería estar.*

**- Britney Yeniett Hernández Fajardo**

### **Agradecimientos**

Queremos agradecer en primer lugar a nuestras familias por su apoyo incondicional durante todo nuestro proceso de preparación como profesionales. A la Universidad Industrial de Santander por abrirnos las puertas y permitirnos formarnos como seres profesionales, humanos con ética y valores. A los docentes de la Escuela de Geología por compartir sus conocimientos y demás que aportaron ya sea de forma directa e indirecta en la preparación de esta bonita profesión. A nuestro director Paul Yesid Goyes por su arduo acompañamiento, guía y valioso conocimiento aportado durante todo el desarrollo del proyecto. A nuestro codirector Luis Eduardo Moreno por sus consejos, apoyo y saber, por demostrarnos que las cosas se deben hacer siempre al derecho, a su madre doña Betty y a su hermana Liliana, por hacernos parte de la familia y ser tan amables durante nuestra estadía en Málaga. Al profesor José David Sanabria de la Escuela de Física junto con el laboratorio de geofísica por prestarnos el equipo ABEM WalkTEM. A nuestro director de escuela Mario García por ser nuestro representante de geología para el préstamo del equipo. Al geólogo Ángel Salazar por capacitarnos en el uso de este equipo y de su software SPIA, y brindarnos todo el conocimiento y guía con respecto al método TDEM, y a la empresa de HidroIngeniería por permitirnos usar este software SPIA dentro de sus instalaciones. A la UIS Sede Málaga por darnos el acceso para realizar sondeos. Al estudiante de geología Kevin Parra por ayudarnos con el transporte y montaje de los equipos, esperamos haber despertado en ti algún interés por esta rama de la geología. A don Efraín, don José, don Gilberto, don Julio y don Noe y a sus familias por permitirnos entrar a sus fincas y terrenos para llevar a cabo las mediciones, especialmente gracias a don Antonio por su interés, colaboración y nobleza. Y a todos los que aportaron su granito de arena para que este proyecto pudiera desarrollarse. A todos mil gracias.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	14
1. Justificación y Planteamiento del Problema .....	17
2. Objetivos.....	19
2.1 Objetivo General .....	19
2.2 Objetivos Específicos .....	19
3. Metodología.....	20
3.1 FASE 1 .....	20
3.2 FASE 2 .....	21
3.3 FASE 3 .....	22
3.4 FASE 4 .....	23
4. Marco Teórico.....	24
4.1 Área de estudio .....	24
4.2 Estado del Arte en la Exploración de Aguas Subterráneas.....	26
4.3 Métodos Geofísicos Geoeléctricos.....	28
4.3.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).....	29
4.3.2 Método Electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM).....	30
4.3.3 Magnetotelúrica (MT) .....	31
5. Resultados .....	32
5.1 Revisión y verificación de la geología de la zona de estudio .....	32
5.1.1 Estratigrafía.....	33
5.1.1.1 Depósitos cuaternarios.....	33

5.1.1.2 Formación Tibú-Mercedes (Kitm) .....	34
5.1.1.3 Formación Rionegro (Kirn) .....	36
5.1.2 Geología Estructural.....	38
5.1.3 Geomorfología .....	41
5.2 Modelamiento Geofísico .....	44
5.2.1 Construcción del modelo sintético del subsuelo .....	44
5.2.2 Generación de los modelos teóricos.....	46
5.2.3 Modelamiento con el método Magnetotelúrico .....	49
5.2.3.1 Inversión con el método Magnetotelúrico .....	54
5.2.4 Modelamiento con el método Sondeos Eléctricos Verticales.....	56
5.2.5 Modelamiento con el Método Electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM) .....	60
5.2.6 Análisis comparativo de los métodos geofísicos planteados .....	65
5.3 Adquisición y procesamiento de Sondeos Electromagnéticos en el dominio del Tiempo (TDEM).....	66
5.3.1 Localización e interpretación de datos TDEM .....	68
5.4 Zonas potenciales para el emplazamiento de pozos de explotación de aguas subterráneas....	81
6. Conclusiones.....	83
7. Recomendaciones.....	85
Referencias Bibliográficas .....	86
Anexos.....	92

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Tabla de rangos de resistividad eléctrica para las litologías presentes en la zona de estudio según diferentes autores. ....	45
Tabla 2. Matriz comparativa de los métodos geofísicos trabajados. ....	65

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización área de estudio.....	26
Figura 2. Diagrama de flujo recomendado del proceso de exploración de aguas subterráneas. ...	27
Figura 3. (A). Visual de un depósito coluvión cubierto en la Vereda El Barzal. Fotografía FPB-01. (B). Afloramiento de un coluvión al margen del Río Servitá. Fotografía FPB-05.....	33
Figura 4. (A). Capas de caliza con intercalaciones lodosas. (B) Capa de caliza de donde fue tomado la muestra MPB-01. (C). Capa de lodolitas calcáreas de color gris oscuro bioturbadas. Fotografías FPB-02 (A), FBP-02C (B) y FPB-03(C). A, B y C Fm Tibú-Mercedes.....	35
Figura 5. (A y B) Capas de lodolitas y areniscas densamente fracturadas en forma de cuña de la Formación Rionegro. Fotografías FPB-09 (A) y FPB-17 (B). ....	37
Figura 6. Mapa geológico y estructural de la zona de estudio. ....	39
Figura 7. Columna estratigráfica de la Formación Rionegro (Kirn).....	40
Figura 8. Mapa Geomorfológico del área de estudio.....	43
Figura 9. Perfil geológico del área de estudio. ....	44
Figura 10. Perfil de resistividad eléctrica del área de estudio. ....	46
Figura 11. Modelo teórico sin variación de espesor o de resistividad. ....	47
Figura 12. Modelos teóricos con variación de la resistividad .....	48
Figura 13. Modelos teóricos con variación de espesor. ....	48
Figura 14. Curvas de resistividad aparente y fase vs frecuencia, obtenida con el modelo teórico sin variación de la zona de estudio. ....	49
Figura 15. Curvas de resistividad aparente y fase vs frecuencia, obtenidas a partir del modelamiento 1D con los modelos teóricos de variación de espesores.....	51

Figura 16. Curvas de resistividad aparente y fase vs frecuencia, obtenidas a partir del modelamiento 1D con los modelos teóricos de variación de las resistividades. ....	52
Figura 17. Curvas de resistividad aparente y fase vs frecuencia, obtenidas a partir del modelamiento 1D con los modelos teóricos de variación de las resistividades (A) y espesores (B) de las unidades preexistentes. ....	53
Figura 18. Inversión del modelo 1 de cambio de resistividades. ....	55
Figura 19. Curvas de resistividad vs profundidad (izquierda), y resistividad aparente vs AB/2 (derecha) del modelo teórico original. ....	57
Figura 20. Curvas de resistividad vs profundidad (izquierda), y resistividad aparente vs AB/2 (derecha) de los modelos teóricos con variación de espesor. ....	58
Figura 21. Curvas de resistividad vs profundidad (izquierda), y resistividad aparente vs AB/2 (derecha) de los modelos teóricos con variación. ....	59
Figura 22. Simulación directa e inversión 1D del modelo teórico sin variación de resistividad o de espesor. ....	61
Figura 23. Simulación directa e inversión 1D de los modelos teóricos con variación de espesor. ....	62
Figura 24. Simulación directa e inversión 1D de los modelos teóricos con variación de resistividad. ....	63
Figura 25. Componentes del sistema ABEM WalkTEM. ....	67
Figura 26. Localización de los Sondeos TDEM. ....	68
Figura 27. Proceso de inversión en el software SPIA. ....	69
Figura 28. Localización TDEM-02. ....	70
Figura 29. Procesamiento e Interpretación TDEM-02. ....	71

Figura 30. Localización TDEM-04.....	72
Figura 31. Procesamiento e Interpretación TDEM-04.....	73
Figura 32. Localización TDEM-05.....	74
Figura 33. Procesamiento e Interpretación TDEM-05.....	75
Figura 34. Localización TDEM-09.....	76
Figura 35. Procesamiento e Interpretación TDEM-09.....	77
Figura 36. Localización TDEM-10.....	78
Figura 37. Procesamiento e Interpretación TDEM-10.....	79
Figura 38. Modelo geoelectrico final unificado con la información geológica de la zona. ....	80
Figura 39. Localización con mayor potencial para el emplazamiento del pozo de explotación de aguas subterráneas.....	82

### Lista de Anexos

	<b>Pág.</b>
Anexo 1. Resumen de los diferentes métodos eléctricos y electromagnéticos a usar en el proyecto con sus principales características.....	92
Anexo 2. Clasificación de los métodos geofísicos.....	93
Anexo 3. Cuadro resumen de las estaciones tomadas en campo con su respectiva descripción...94	
Anexo 4. Capas de caliza de la Fm Tibú-Mercedes con estratificación plano-paralela, bioturbadas y bastante fracturadas en dirección vertical. Fotografía FPB-04.....	95
Anexo 5. Muestras de mano de la Fm Tibú-Mercedes con su descripción. Fotografías de la FPB-28 a la FPB.34.....	96
Anexo 6. Cuadro de clasificación para rocas carbonatadas según Dunham (1962). ....	97
Anexo 7. Calizas de la Fm Tibú-Mercedes karstificadas. ....	98
Anexo 8. (A). Contacto fallado entre la Formación Tibú-Mercedes la Formación Rionegro. (B). Fracturamiento, diaclasamiento y meteorización en las lodolitas. Fotografía FPB-14(A) y FPB-13. ....	99
Anexo 9. Contacto entre areniscas y lodolitas siliciclásticas de la Formación Rionegro. Fotografía FPB-21.....	100
Anexo 10. Tipos de areniscas según su composición de las muestras recolectadas en la zona de estudio en el diagrama de Folk. ....	101
Anexo 11. Muestras de mano de la Formación Rionegro (Kirn) con su descripción. Fotografías FPB-35 a la FPB-45. ....	102
Anexo 12. Datos tomados para construir la poligonal. ....	103

Anexo 13. Tabla de las litologías que conforman el subsuelo de la zona de estudio con su respectivo espesor y resistividad, determinados en el apartado anterior. ....	104
Anexo 14. Tablas de los modelos teóricos generados con variaciones en los valores de resistividad de las litologías que conforman el subsuelo de la zona de estudio.....	105
Anexo 15. Tablas de los modelos teóricos generados con variaciones en los valores de espesor de las litologías que conforman el subsuelo de la zona de estudio con su respectiva resistividad que representan diferentes escenarios posibles durante la adquisición. ....	106
Anexo 16. Localización TDEM-01.....	107
Anexo 17. Localización TDEM-03.....	108
Anexo 18. Localización TDEM-06.....	109
Anexo 19. Localización TDEM-07.....	110
Anexo 20. Localización TDEM-08.....	111
Anexo 21. Procesamiento e Interpretación TDEM-03.....	112
Anexo 22. Procesamiento e Interpretación TDEM-06.....	113
Anexo 23. Procesamiento e Interpretación TDEM-07.....	114
Anexo 24. Procesamiento e Interpretación TDEM-08.....	115
Anexo 25. Disposición del arreglo para la Adquisición TDEM.....	116
Anexo 26. Sumidero localizado cerca a la pista del Aeropuerto, producido por los procesos de karstificación, asociados a las calizas de la Formación Tibú-Mercedes. ....	117
Anexo 27. Tabla de coordenadas de los sondeos TDEM.....	118

## Resumen

**Título:** EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS USANDO PERFILES DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN LOS MIEMBROS SUPERIORES DE LA FORMACIÓN RIONEGRO ENTRE EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE MÁLAGA (SANTANDER) Y EL RÍO SERVITÁ\*

**Autor:** Paula Bohórquez y Britney Hernández\*\*

**Palabras Clave:** Agua subterránea, Formación Rionegro, geoelectrica, Málaga, resistividad, TDEM.

El agua es un recurso primordial para la vida que, dada su limitación con respecto a la cantidad, calidad, mal uso y distribución, distintas comunidades se han enfrentado actualmente a un desabastecimiento. Ante esto, las aguas subterráneas han aparecido como una solución a tal preocupación. El municipio de Málaga no es la excepción a esta problemática, ya que el acueducto municipal no cuenta con la suficiente cantidad de este recurso para suplir las necesidades de sus habitantes. Con base en estudios hidrogeológicos y geofísicos previos, se ha determinado la posibilidad de la presencia de un sistema acuífero bajo el municipio debido a la geología presente, pero estos estudios no han contado con la penetración suficiente para caracterizar la litología ideal de almacenamiento, que en este caso serían las areniscas de la Formación Rionegro. En este caso se decidió el uso de perfiles de resistividad obtenidos a través de la aplicación del método TDEM, elegido por medio de simulaciones generadas con ayuda de códigos de programación; con las curvas de respuesta se realizó la caracterización del subsuelo a partir de modelos geoelectricos, en donde se estimaron las resistividades y espesores de las unidades geológicas que conforman la zona obteniendo un modelo geológico. Estos modelos dieron como resultado que los miembros superiores de la Formación Rionegro se encuentran en estado de saturación, gracias a un alto nivel de fracturamiento que da lugar a una porosidad secundaria otorgándole una vocación acuífera.

---

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Paul Yesid Goyes Peñafiel. PhD (c) en Ciencias de la Computación. Codirector: Luis Eduardo Moreno Torres. Especialista en Ingeniería Ambiental.

**Abstract**

**Title:** GROUNDWATER EXPLORATION USING ELECTRICAL RESISTIVITY PROFILES IN THE UPPER MEMBERS OF THE RIONEGRO FORMATION BETWEEN THE URBAN AREA OF THE MUNICIPALITY OF MALAGA (SANTANDER) AND THE SERVITÁ RIVER\*

**Author(s):** Paula Bohórquez and Britney Hernández<sup>1</sup>

**Key Words:** Geoelectric, Málaga, resistivity, Rionegro Formation, TDEM, underground water.

Water is a fundamental resource for life that, due to its limitation in terms of quantity, quality, misuse, and distribution, many communities are currently facing water scarcity. In this context, groundwater has emerged as a solution to this concern. The municipality of Málaga is no exception to this issue, as the municipal aqueduct does not have enough water to meet the needs of its inhabitants. Based on previous hydrogeological and geophysical studies, the possibility of an aquifer system beneath the municipality has been determined due to the present geology, but these studies have not had sufficient penetration to characterize the ideal lithology for storage, which in this case would be the sandstones of the Formación Rionegro. In this case, the use of resistivity profiles obtained through the application of the TDEM method was decided, chosen through simulations generated with the help of programming codes. The subsurface was characterized based on the response curves, and geoelectric models were used to estimate the resistivities and thicknesses of the geological units that make up the area, obtaining a geological model. These models resulted in the finding that the upper members of the Formación Rionegro are saturated, thanks to a high level of fracturing that gives rise to secondary porosity, making it a potential aquifer.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: Paul Yesid Goyes Peñafiel. PhD (c) in Computer Sciences. Co-director: Luis Eduardo Moreno Torres. Specialist in Environmental Engineering.

## Introducción

El agua es un recurso primordial para el sostenimiento de la vida en el planeta Tierra. El desarrollo de la civilización y la sociedad ha estado estrechamente vinculado con el agua, ya que su uso y disponibilidad son factores importantes para el establecimiento de plantas industriales, viviendas, entidades estatales, instituciones de salud y educación, todo tipo de actividad humana, las cuales promueven el desarrollo de los centros urbanos, industriales y agropecuarios. Sin embargo, con base en los estudios realizados y/o publicados en organizaciones medioambientales o centros de investigación (como *NATURALIZA (2019)* y *CAI (2015)*), este recurso es escaso o limitado, por lo que el hombre ha estado en una constante búsqueda de nuevas fuentes de suministro de este.

El municipio de Málaga (Santander), pese a tener un clima fresco con temperaturas moderadas (generalmente de 11°C a 19 °C), presenta inviernos cortos con pocas precipitaciones al año y largos periodos de sequía (*Weather Spark, 2022*), generando bajos o nulos niveles en las quebradas o cuerpos de agua que surcan el municipio. A lo anterior, se le suma un desarrollo urbano no planificado y mal manejado, que ha provocado la deforestación de una buena parte del municipio. Con base en los factores mencionados anteriormente, se ha venido presentando un desabastecimiento de agua en el acueducto municipal afectando a una población cercana a los 20.000 habitantes, por lo que la alcaldía ha implementado medidas de racionamiento en el suministro de este recurso (*Empresas Públicas Municipales de Málaga, 2022*).

A nivel geológico, el municipio se encuentra localizado en el eje del sinclinal de Málaga, aflorando en superficie calizas de la Formación Tibú-Mercedes (Kitm) que a simple vista se observan karstificadas o en proceso de disolución, situación que define porqué la mayoría del año

las corrientes superficiales que surcan esa zona permanecen secas o sin flujo (*Suárez, 2021*). Según la plancha geológica 136 del Servicio Geológico Colombiano, a esta unidad la infrayace la Formación Rionegro (Kirn) cuyos miembros superiores están conformados por niveles de areniscas, las cuales, por su posición en la charnela del sinclinal, deben estar fracturadas por tracción y posiblemente saturadas, lo que genera un ambiente ideal para la acumulación de agua (*Suárez, 2021*). El grado de fracturamiento de las calizas fue estudiado inicialmente y de manera superficial por *Rincón (2019)* y más seriamente por *Suárez (2021)*. Adicional a los esfuerzos de tracción por el plegamiento, en el área de estudio, aparecen una serie de fallas, entre las cuales están la de Málaga, Servitá, Buenavista y El Término que podrían contribuir significativamente al fracturamiento de las litologías presentes.

Las aguas subterráneas se han convertido en una alternativa para el abastecimiento de las comunidades en vista del agotamiento de las fuentes hídricas superficiales, y actualmente gracias al avance tecnológico de las últimas décadas, se han implementado y encontrado nuevos métodos que permiten su exploración, localización y explotación. Los métodos usados principalmente corresponden a los métodos geofísicos que son aplicados en gran variedad de estudios prospectivos donde se requiere la caracterización geológica del subsuelo. Esto es posible gracias a que las propiedades físicas de los materiales rocosos presentan contrastes que permiten determinar e identificar las diferentes litologías, y de acuerdo con el método usado y la configuración geológica de la zona se puede construir un modelo geológico del subsuelo del área de estudio. Entre las propiedades físicas más comunes que estudian los métodos geofísicos se encuentran la densidad, la permeabilidad magnética, la susceptibilidad, la resistividad eléctrica y el potencial redox. Existe una gran variedad de métodos geofísicos, pero teniendo en cuenta el objetivo de este trabajo y las propiedades físicas a estudiar, los métodos más adecuados son los métodos geoelectrónicos, los

cuales se asocian a la medición de la resistividad eléctrica y son principalmente utilizados en la prospección de yacimientos minerales, hidrocarburos y en la exploración de aguas subterráneas. Los métodos geoelectricos se subdividen en otra variedad de métodos, de los cuales, los más utilizados para la exploración de aguas subterráneas corresponden a: Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's), Magnetotelúrica (MT) y Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TDEM), esto basado en resultados previos obtenidos de varios estudios en el mundo (*Al Farajat et al., 2015; Aizebeokhai & Oyeyemi, 2017; López-Loera, 2014*).

De acuerdo a lo anteriormente descrito, el presente plan de trabajo nace de la necesidad de integrar la aplicación de métodos geoelectricos, el estudio geológico, litológico y estructural de los miembros superiores de la Formación Rionegro, para identificar las capas saturadas que permitan presentar una alternativa de solución a la problemática planteada acerca del abastecimiento del acueducto municipal, ofreciendo la mejor configuración del método geoelectrico a ser usado para la caracterización de areniscas en la exploración de los acuíferos en la zona.

## 1. Justificación y Planteamiento del Problema

El municipio de Málaga (Santander) en la actualidad carece de fuentes hídricas superficiales suficientes para su abastecimiento de agua potable, por lo que recientemente se han tenido que implementar medidas de racionamiento del recurso (*González, 2021; Caracol Radio, 2022*). Con el fin de brindar otras alternativas de abastecimiento, en estudios anteriores se han determinado que los rasgos geológicos, geomorfológicos y estructurales observados en Málaga muestran una alta probabilidad de almacenamiento de agua subterráneas bajo el casco urbano del municipio (*Suárez, 2021*). Según lo anterior, mejorar el conocimiento del subsuelo y contribuir a la exploración de aguas subterráneas resulta imprescindible. Para esta tarea, los métodos geofísicos han mostrado gran utilidad según diversos estudios similares a la exploración de acuíferos (*Al Farajat et al., 2015; Aizebeokhai & Oyeyemi, 2017; López-Loera, 2014*). Específicamente, los métodos más adecuados para este tipo de exploración son los basados en el análisis de la resistividad (o conductividad) eléctrica del subsuelo debido a las relaciones que tiene la resistividad eléctrica con algunas propiedades como la porosidad de la roca, pues a mayor porosidad, ya sea intrínseca o de fractura, será menor la resistividad de la roca; otro factor importante corresponde a la arcillosidad del terreno, ya que a mayor arcillosidad, menor resistividad; puesto que una arcilla que constituye un terreno impermeable tiene mucha agua intersticial que hace bajar la resistividad de la roca, pero que no produce caudal (*Bernard, J., Leite, O., 2015*); y con base en estas propiedades, las capas saturadas que conforman los acuíferos generan anomalías de resistividad y se pueden evidenciar en perfiles 1D o 2D. No obstante, en el área de estudio la capa acuífera está relacionada con las areniscas de la Formación Rionegro (Kirn), las cuales infrayacen un segmento de calizas altamente fracturadas (*Suárez, 2021*), lo cual ocasiona

que los cambios de resistividad en profundidad sean de alto contraste y que el contacto litológico se encuentre de forma irregular, ya que la Formación Rionegro cuenta con unos niveles de lutitas las cuales presentan baja resistividad y son casi impermeables, pudiendo dificultar la toma de datos y su posterior interpretación. Es conocido que la determinación de los acuíferos en ambientes kársticos es imprecisa y dispersa debido a la estructura del sistema y de su funcionamiento, ya que presenta características tanto de drenajes superficiales como de acuíferos porosos.

Debido a la geología del municipio, el reto actual radica en determinar el método o los métodos geoelectricos más adecuados para la zona de estudio que permitan definir con mayor resolución la Formación Rionegro (Kirn) por medio de la obtención de un modelo geoelectrico a una profundidad donde se pueda delimitar los miembros superiores de dicha formación, ya que existe un gran contraste de resistividades que hay en la zona generado por los procesos de karstificación y fracturamiento en la Formación Tibú-Mercedes (Kitm) que suprayace a la Formación Rionegro (Kirn), y que puede generar ruido en el momento de la toma de datos y, afectar la precisión del modelo generado para el área estudiada.

Con base en lo anterior, este plan de trabajo surge de la necesidad de explorar nuevas zonas prospectivas para aguas subterráneas a partir de la elaboración e interpretación de un modelo geológico del subsuelo de la zona de estudio por medio de la aplicación de un método geoelectrico que permita caracterizar con alta confiabilidad la resistividad eléctrica del miembro superior de la Formación Rionegro (Kirn) y determinar su vocación acuífera, para finalmente contribuir a resolver la problemática de desabastecimiento de agua potable en Málaga (Santander) mediante la identificación de posibles zonas de emplazamiento de un pozo de bombeo.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Explorar las aguas subterráneas usando perfiles de resistividad eléctrica en las areniscas del miembro superior de la Formación Rionegro (Kirn) entre el casco urbano del Municipio de Málaga (Santander) y el Río Servitá.

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Realizar una revisión y verificación en campo del contexto geológico, geomorfológico y estructural de la zona comprendida entre el casco urbano del municipio de Málaga (Santander) y el Río Servitá.

2. Seleccionar el método geoelectrico adecuado para la exploración geofísica en ambientes de altos contrastes de resistividad a partir de la revisión bibliográfica y el análisis comparativo y modelamiento de configuraciones y parámetros de adquisición.

3. Construir un modelo geoelectrico del área de estudio a partir de los datos adquiridos en la exploración geofísica e integrarlo con información geológica para determinar las capas con vocación acuifera en los miembros superiores de la Formación Rionegro (Kirn).

4. Identificar posibles zonas de emplazamiento de pozos de explotación acuifera, a partir del modelo geoelectrico y geológico del área de estudio.

### **3. Metodología**

Para desarrollar los objetivos específicos propuestos se llevó a cabo la siguiente metodología dividida en actividades detalladas como se muestra a continuación:

#### **3.1 FASE 1: Elaboración de la revisión y verificación en campo del contexto geológico, geomorfológico y estructural de la zona comprendida entre el casco urbano del municipio de Málaga (Santander) y el Río Servitá.**

ACTIVIDAD 1.1: Revisar en estudios previos realizados en el área de estudio los aspectos litológicos, geomorfológicos y estructurales, como punto de partida para el trabajo de investigación. Teniendo en cuenta la nomenclatura geológica correspondiente, los rasgos estructurales y geomorfológicos, edades, ambientes, y otros que contribuyan a la fase propuesta.

ACTIVIDAD 1.2: Realizar un esquema con puntos de control dentro de un mapa topográfico del área de estudio para determinar la posición de posibles estaciones en campo que proporcionen una caracterización completa de la geología, geomorfología, y las estructuras existentes.

ACTIVIDAD 1.3: Desarrollar teniendo en cuenta esos puntos de control, una descripción detallada de los principales rasgos litológicos (niveles estratigráficos con vocación acuífera), geomorfológicos (determinación de ambientes y geoformas predominantes) y las estructuras que definen la tectónica del área (pliegues, fallas, diaclasas), corroborando la geología dicha en estudios anteriores.

ACTIVIDAD 1.4: Interpretar, compilar y organizar la información recopilada en la ACTIVIDAD 1.3, y representarla de forma gráfica en un Sistema de Información Geográfica (SIG), haciendo uso de elementos vectoriales, ráster y tablas; para definir contactos litológicos e

integrar la información geomorfológica y estructural descrita, para generar como resultado el mapa de la cartografía geológica, geomorfológica y estructural, junto con un perfil geológico representativo y una columna estratigráfica general de la formación objeto de estudio.

### **3.2 FASE 2: Determinación del método geoelectrico adecuado a partir de la revisión bibliográfica y el análisis comparativo y modelamiento de diferentes métodos geoelectricos relacionados con la exploración geofísica en ambientes geológicos de alto contraste de resistividad eléctrica.**

ACTIVIDAD 2.1: Generar un modelo geoelectrico preliminar a la adquisición de datos en campo a partir del modelo geológico del área de estudio obtenido en la ACTIVIDAD 1.4 (corte geológico), donde se representen cada una de las unidades según sus valores de resistividad y, los espesores determinados en campo.

ACTIVIDAD 2.2: Realizar el modelamiento o simulación con la implementación de los métodos geoelectricos de SEV, TDEM y MT, los cuales son seleccionados para el análisis ya que el uso de estos equipos se garantiza por medio del préstamo por parte de la escuela de Geología y Física de la universidad, lo que los hace candidatos factibles para una futura adquisición. Esta actividad se desarrollará haciendo uso de la librería SimPEG de Python<sup>1</sup> para el desarrollo del modelo de TDEM y MT, y la librería PyGIMLi<sup>2</sup> para los modelos de SEV. Finalmente, se realizará la descripción de su comportamiento en las mediciones sintéticas (respuesta del modelamiento) para diferentes configuraciones de adquisición y parámetros geométricos.

ACTIVIDAD 2.3: Ejecutar la inversión de los datos geofísicos modelados en la ACTIVIDAD 2.2 en la librería SimPEG y la librería PyGIMLi, y determinar el método geofísico

---

<sup>1</sup> Para más información acerca de SimPEG: [https://docs.simpeg.xyz/content/basic/big\\_picture.html](https://docs.simpeg.xyz/content/basic/big_picture.html)

<sup>2</sup> Para más información acerca de PyGIMLi: <https://www.pygimli.org/index.html>

que presente una mayor resolución de anomalías de resistividad y permita evidenciar de mejor manera los contrastes de resistividad eléctrica entre las unidades litológicas, en especial el contacto entre las calizas fracturadas de la Formación Tibú-Mercedes (Kitm) y las areniscas de la Formación Rionegro (Kirn) dentro del área de estudio, para determinar sus límites en profundidad. Posteriormente se realizará un análisis comparativo por medio de una matriz de beneficios y desventajas de cada método analizado a partir de los resultados de la inversión, donde se concluirá el método o métodos geoelectricos más adecuados para la situación geológica del área de estudio.

**3.3 FASE 3: Obtención del modelo geoelectrico en profundidad del área de estudio a partir de la inversión de los datos obtenidos en campo e integrarlo con información geológica para determinar las capas con vocación acuífera en los miembros superiores de la Formación Rionegro (Kirn).**

ACTIVIDAD 3.1: Construir una malla para la disposición de puntos de control sobre el área de estudio, en los cuales se realizará la toma de datos de resistividad mediante la aplicación del método o métodos geofísicos más adecuados para la investigación determinados en la ACTIVIDAD 2.3.

ACTIVIDAD 3.2: Realizar la adquisición de datos a partir de la aplicación del método o métodos geoelectricos seleccionados en la ACTIVIDAD 2.3 en el área de estudio, donde se obtendrán resultados con una alta resolución y contraste que representen con confiabilidad la disposición litológica de la zona de estudio.

ACTIVIDAD 3.3: Procesar y organizar los datos geofísicos obtenidos en la ACTIVIDAD 3.2, para llevar a cabo su posterior inversión y finalmente obtener un modelo geoelectrico donde

se pueda identificar la variación y/o anomalías de resistividad eléctrica asociadas a las unidades litológicas existentes y localizarlas en profundidad.

ACTIVIDAD 3.4: Interpretar e integrar la información geológica adquirida en la FASE 1, con el modelo geoelectrico obtenido en la ACTIVIDAD 3.3, para conformar un modelo geológico del subsuelo dentro del área de estudio, que permita delimitar los espesores de las unidades litológicas, y determinar la vocación acuifera de las areniscas de los miembros superiores de la Formación Rionegro (Kirn) con base en la ubicación espacial y el contraste de las capas según su resistividad.

#### **3.4 FASE 4: Identificación de posibles zonas de emplazamiento de pozos de explotación acuifera, a partir del modelo geoelectrico y geológico del área de estudio.**

Establecer las posibles zonas donde se podrían localizar los pozos para la explotación de aguas subterráneas, con base en la caracterización y delimitación de la unidad con vocación acuifera determinada en la ACTIVIDAD 3.4, teniendo en cuenta el contraste de resistividades entre las diferentes capas litológicas presentes en la zona de estudio, que además muestren espesores considerables para garantizar la producción adecuada y así, la posterior explotación de las aguas subterráneas.

## 4. Marco Teórico

### 4.1 Área de estudio

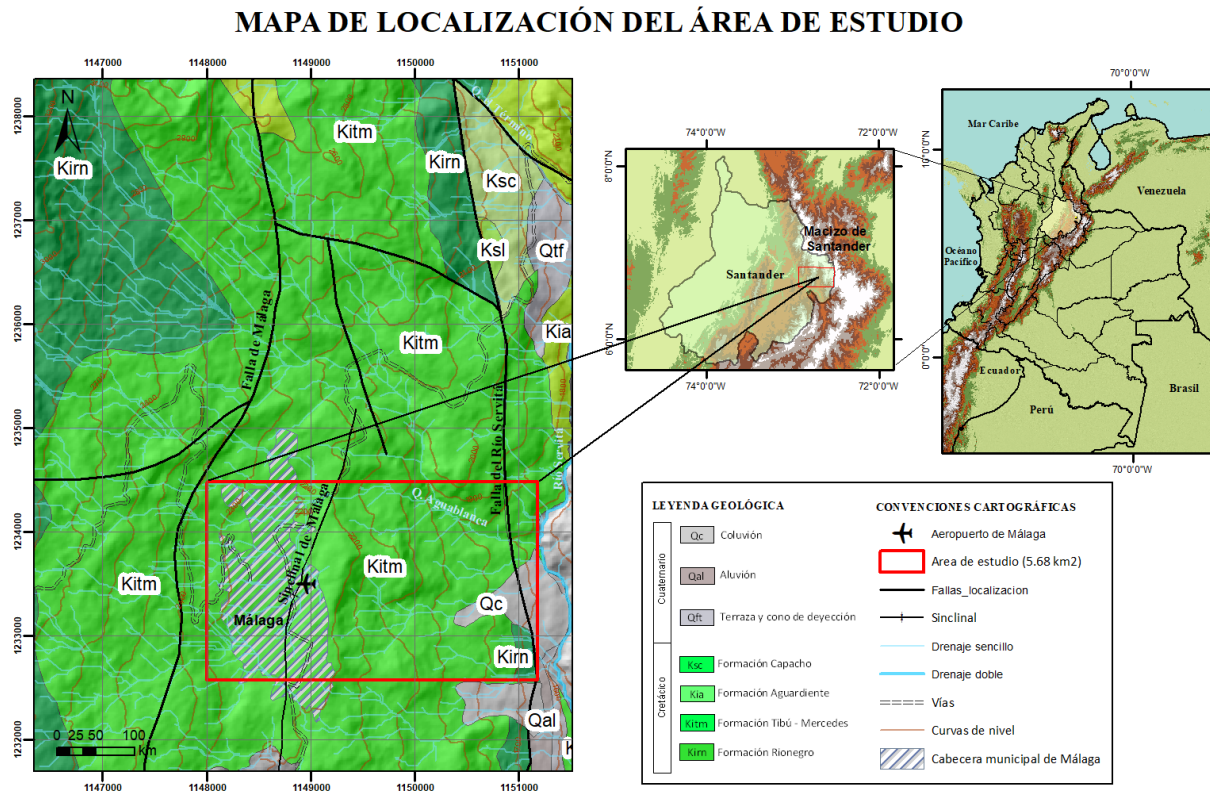
El área de estudio se encuentra ubicada entre el casco urbano del municipio de Málaga y el Río Servitá, específicamente localizada al noreste de la plancha geológica 136 Málaga, entre las siguientes coordenadas, 6°42'46.915''N 72°44'06.28''W, 6°42'45.48''N 72°42'31.07W, 6°41'47.20''N 72°42'28.50''W y 6°41'55.11''N 72°44'04.00''W. Según el Servicio Geológico Colombiano, Málaga se sitúa al oriente del Macizo de Santander y parte más septentrional del Macizo de Floresta.

Como se observa en la **Figura 1**, en el área de estudio afloran la Formación Tibú-Mercedes (Kitm) y la Formación Rionegro (Kirn), las cuales son unidades de interés para el desarrollo del trabajo. Además, afloran cerca al área de estudio otras unidades cretácicas como la Formación Capacho (Ksc) y la Formación Aguardiente (Kia), así como algunos cuaternarios. Estructuralmente el área se encuentra atravesada por el Sinclinal de Málaga y esta influenciada por la Falla del Río Servitá (**Figura 1**) y por otras fallas normales asociadas a esta y otros plegamientos locales productos de la actividad tectónica de la zona.

Litológicamente la Formación Tibú-Mercedes (Kitm) consta en la sección Tibú de areniscas de grano grueso hacia la base y, calizas fosilíferas y grises intercaladas con unas pocas capas de lutitas negras y areniscas de grano fino hacia el techo. El contacto neto conforme entre la Formación Tibú y la Formación Mercedes es un espeso paquete de lutitas negras fisiles. La edad de la Formación Tibú-Mercedes ha sido considerada como aptiano superior a albiano inferior (*Notestein et al., 1944*). De acuerdo con su litología, la Formación Tibú-Mercedes presenta permeabilidades y porosidades variables, por lo que no es factible buscar en esta unidad capas con

vocación acuífera, que permitan una posterior explotación de agua subterráneas. La Formación Rionegro consta de areniscas y arcosas de grano grueso con algunas capas de conglomerados, areniscas de grano fino intercaladas con lutitas oscuras, los conglomerados presentan un alto grado de fracturación, por lo anterior esta formación es idónea para el almacenamiento de agua. La edad de la Formación Rionegro no ha sido claramente definida, según *Richards (1968)* se considera neocomiano – aptiano y según *Julivert et al (1968)* como valanginiano.

La Falla del Río Servitá se encuentra al este del área de estudio, siguiendo el curso del Río Servitá, esta constituye el límite entre el Macizo de Santander y la franja sedimentaria del borde oriental del macizo, presenta un trazo rectilíneo que pone en contacto en el sector de Málaga rocas de edad cretácica al este, con rocas del Grupo Girón y de la Formación Floresta al oeste. Existen otras fallas paralelas a la Falla del Río Servitá más locales y de cinemática inversa. El Sinclinal de Málaga es una estructura asimétrica que cierra al sur, cortada transversalmente por la Falla del Río Servitá. El núcleo lo constituye la Formación Tibú – Mercedes, el flanco oeste aparece fracturado por la Falla de Málaga, que es de débil salto y genera que este flanco sea abrupto y no presente límite tectónico neto con el flanco oriental del anticlinal. Finalmente, en el área existen dos límites tectónicos, el límite al oeste constituido por la Falla de Baraya y el límite al este determinado por la Falla del Río Servitá, y asociados a estos límites se ha formado una zona característica de plegamiento, donde se encuentra localizado el Municipio de Málaga.

**Figura 1.** Localización área de estudio.

Nota: Geología base tomada de la plancha 136-Málaga del Servicio Geológico Colombiano.

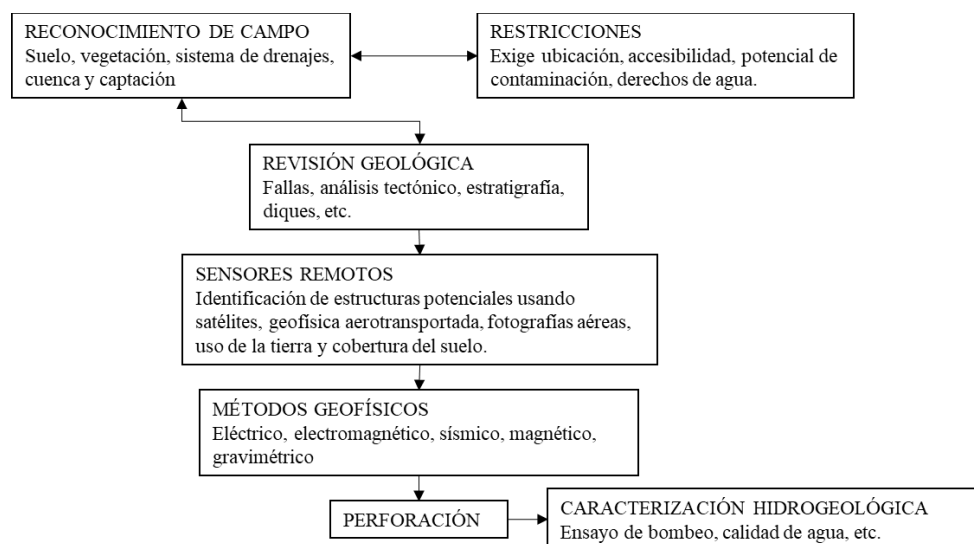
## 4.2 Estado del Arte en la Exploración de Aguas Subterráneas

El agua subterránea es aquella que parte del agua del ciclo hidrológico que está bajo la superficie del terreno (*Davis & De Wiest, 1966*), y esta constituye un recurso del subsuelo que brinda oportunidades de desarrollo a la sociedad, además de ser una alternativa para consumo humano en las zonas con demanda de agua potable y útil para llevar a cabo proyectos agroindustriales, mineros y de hidrocarburos. Su ocurrencia se da en varios tipos de espacios abiertos en las rocas, tales como fisuras, intersticios entre granos, poros, grietas, fracturas, planos de foliación, planos de falla y diaclasas; debido a las diferencias de presión hidrostática, el agua

permanece en continuo movimiento. Se puede decir entonces que la existencia, el movimiento y el almacenamiento del agua subterránea están controlados por la secuencia estratigráfica, la litología, los espesores y la configuración estructural de los materiales que conforman la corteza terrestre (Otálvaro et al., 2011).

La exploración de aguas subterráneas comprende todos los estudios que se encuentran encaminados a la localización, definición de las dimensiones y caracterización de las zonas favorables para la acumulación de aguas subterráneas. Para ello primero es necesario realizar un reconocimiento geológico del área implicada, ya que es la información base para los estudios hidrogeológicos, y define las propiedades de las rocas y las estructuras geológicas favorables para almacenar aguas subterráneas. Asimismo, mediante el uso de sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG) se pueden delimitar áreas aptas para la recarga de acuíferos que presenten litologías porosas, fracturas máximas, regiones altamente meteorizadas y regiones de pendiente nula. (Muchingami et al., 2019). En la **Figura 2** se muestra el diagrama de flujo que resume el proceso recomendado para una adecuada exploración de aguas subterráneas.

**Figura 2.** Diagrama de flujo recomendado del proceso de exploración de aguas subterráneas.



Nota: Tomado y modificado de: Muchingami et al., (2019).

Los métodos geofísicos actúan en la exploración de las aguas subterráneas como métodos indirectos o estructurales, y permiten determinar de manera rápida, económica y sencilla las propiedades físicas del subsuelo, la estratigrafía de las unidades geológicas, la disposición de heterogeneidades y fallas, el nivel freático, así como propiedades de los suelos y rocas para deducir su comportamiento mecánico. Los métodos geofísicos más utilizados en la actualidad son los métodos gravimétricos, magnéticos, eléctricos, sísmicos (*Giménez, et al., 2021*). **(Ver Anexo 2)**. Numerosas investigaciones con fines hidrogeológicos han demostrado que los métodos geofísicos constituyen una herramienta complementaria para entender el escenario geológico en el que el agua se encuentra alojada (*Giménez et al., 2021*). En el presente plan de trabajo se propone el uso de una serie de métodos eléctricos y electromagnéticos, los cuales serán explicados con detalle en el siguiente apartado.

### **4.3 Métodos Geofísicos Geoeléctricos**

Los métodos de prospección geoeléctrica de superficie se han venido utilizando para solucionar los problemas en la investigación de aguas subterráneas, minería y actualmente en geotecnia. La aplicación de estos métodos se basa en la medición de la resistividad eléctrica del subsuelo (*Reynolds, 2011*). Los métodos geofísicos de resistividad eléctrica se pueden usar de manera efectiva como una herramienta para la prospección de sitios adecuados para la extracción de agua subterránea y para monitorear la profundidad promedio del lecho rocoso, así como para el mapeo en los acuíferos de basamento (por ejemplo, en *Bhattacharya & Patra, 1968; Zohdy, 1969; Koefeod, 1989; Muchingami et al. 2019; Chuma et al. 2013*) y para la estimación de parámetros hidrogeológicos en acuíferos. Los métodos geofísicos por analizar en esta propuesta son: Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), Método Electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM) y

magnetotelúrica (MT); las características principales de estos métodos se encuentran de forma resumida en el **Anexo 1**.

#### **4.3.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)**

Este método consiste en interpretar los distintos materiales del subsuelo a partir de las variaciones de la resistividad al paso de la corriente eléctrica y ver las características como su grado de saturación y la calidad del agua que almacenan estos materiales y por lo tanto darán mayor precisión en la elección del sitio perforado. Tradicionalmente, el sondeo eléctrico vertical (SEV), que esencialmente determina la variación vertical de la resistividad del subsuelo con la profundidad, ha tenido mucho éxito en delimitar las capas del subsuelo, el espesor de la sobrecarga y la profundidad del basamento fracturado y/o fresco en estudios de resistividad geoeléctrica para la exploración de aguas subterráneas (*Aizebeokhai & Oyeyemi, 2018*).

Los Sondeos Eléctricos Verticales se llevan a cabo usando un conjunto de cuatro electrodos, dos electrodos de corriente y dos de potencial. Incrementando progresivamente el espaciado entre los electrodos de corriente y/o los electrodos de potencial se alcanzan mayores profundidades de investigación. Los espaciados más cortos entre los electrodos miden la distribución de la resistividad en el subsuelo a poca profundidad, mientras que los espaciados más largos proporcionan información a niveles más profundos (*Everest Geophysics, 2020*).

Los SEV's deben aplicarse en áreas donde se asume que el suelo tiene capas horizontales con muy poca variación lateral, ya que las curvas de sondeo solo pueden interpretarse usando un modelo de tierra en capas horizontales (1D). Para medir los valores de resistividad se usa un medidor de resistividad, estos medidores dan un valor de resistencia, calculado mediante la siguiente ecuación:

$$R = \frac{V}{I}$$

Donde  $R$  es la resistencia,  $V$  es la diferencia de potencial,  $I$  es la intensidad de la corriente, pero en la práctica el valor de resistividad es aparente y se calcula usando la expresión:

$$\gamma_a = kR$$

Donde  $\gamma_a$  es la resistividad aparente,  $k$  es una constante geométrica que depende del arreglo de los electrodos,  $R$  es la resistencia. El valor aparente es la resistividad de un suelo homogéneo que dará el mismo valor de resistencia para la misma disposición de electrodos. La relación entre estas dos resistividades es compleja y para determinar la resistividad real del subsuelo, se debe realizar una inversión de los valores de resistividad aparente medidos usando algún software. A pesar de su principal limitación, el método de Sondeos Eléctricos Verticales es muy común debido a su forma sencilla de utilizarlo y a la relativa economía de los instrumentos para la adquisición de datos.

#### **4.3.2 Método Electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM)**

El TDEM (Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo) es un método electromagnético de fuente controlada en el dominio del tiempo, que utiliza la difusión de un campo electromagnético transitorio. El principio operativo del método TDEM consiste en hacer circular cíclicamente, en cortos periodos de tiempo, un campo eléctrico alterno alrededor de una bobina transmisora. Durante el periodo de conexión se origina un campo magnético primario estable en el subsuelo. Cuando se corta de forma instantánea la corriente que circula por la bobina transmisora (y por tanto cesa el campo magnético primario) el campo EM inducido en el subsuelo causa corrientes parásitas (EMF) que se propagan a través del terreno e inducen campos secundarios que decaen en el

tiempo. Este decaimiento es el que contiene la información de la resistividad del subsuelo y es medido mediante las antenas receptoras.

La profundidad de la investigación se puede adaptar a objetivos específicos variando el tamaño del bucle del transmisor. Debido a esto, el TDEM es adecuado para un amplio espectro de proyectos, que van desde sondeos a escala de la corteza terrestre (escala mayor a 10 Km) hasta trabajos de recursos de aguas profundas (mayor a 1 km), trabajos de evaluación de diques (mayor a 5 metros) y trabajos con artefactos explosivos sin detonar (menor a 1 metro), (*Olson Engineering, 2021*).

#### **4.3.3 Magnetotelúrica (MT)**

El método magnetotelúrico es una técnica de exploración geofísica pasiva y no invasiva, que consiste en medir desde la superficie las fluctuaciones temporales de los campos electromagnéticos naturales de la Tierra (tormentas eléctricas, corrientes ionosféricas) y determinar la distribución de la resistividad eléctrica en función de la frecuencia (periodo), es decir, en función de la profundidad (desde unos centenares de metros hasta unos centenares de kilómetros) (*ICGC, 2022*). La principal ventaja de este método es que se pueden alcanzar profundidades de exploración que van desde decenas de metros hasta el orden de kilómetros, pero al ser un método en el dominio de la frecuencia, la profundidad de penetración de las ondas electromagnéticas dependerá de la variación de la frecuencia.

De acuerdo con *TRESGEO (2015)*, este método se basa en colocar cuatro sensores electromagnéticos en las extremidades de una cruz de 30 m, luego se graban las fluctuaciones electromagnéticas para 30 minutos o más. La resistividad es muy sensible a pequeños cambios en la composición de un determinado volumen de roca, por lo que estará fuertemente condicionado por factores como la naturaleza y composición de la roca, la porosidad, la proporción de poros

saturados, las características del fluido de saturación, la presión o la temperatura. El método magnetoteléurico se puede aplicar por lo tanto a la definición de los contactos de litologías en el subsuelo, a la detección del nivel freático y a la definición de zonas afectadas por intrusiones salinas. También permite la delimitación de zonas aptas para la explotación de agua subterránea y el control de la calidad de las aguas subterráneas.

## 5. Resultados

### 5.1 Revisión y verificación de la geología de la zona de estudio

La revisión bibliográfica y posterior verificación de la geología preexistente en campo se realizó con el fin de conocer las características de las formaciones geológicas, la geomorfología y las estructuras de la zona de estudio, para definir sus características hidrogeológicas. De esta forma, en esta sección se generó el mapa geológico y geomorfológico, la columna estratigráfica de la Formación Rionegro y el corte geológico del área de estudio.

La zona de estudio está ubicada en Málaga, municipio localizado en la Cordillera Oriental de los Andes en su flanco oriental, situándose al mismo tiempo en el borde oriental del Macizo de Santander y al norte del Macizo de Floresta. Geológicamente la región la constituyen principalmente la Formación Tibú-Mercedes (Kitm) y la Formación Rionegro (Kirn), ambas de edad cretácica, estas formaciones utilizan la nomenclatura de la cuenca de Maracaibo en Venezuela o de la cuenca de Catatumbo en Colombia; hacen parte también de la geología, estructuras importantes como el Sinclinal de Málaga, la Falla del Río Servitá, la Falla Buenavista, la Falla El Término, entre otras (**Figura 6**). Se observó que en la región se presentan tres ambientes geomorfológicos: estructural, denudacional y fluvial.

A continuación, se describe de forma más detallada la estratigrafía, la geología estructural y la geomorfología de la zona de estudio y sus alrededores.

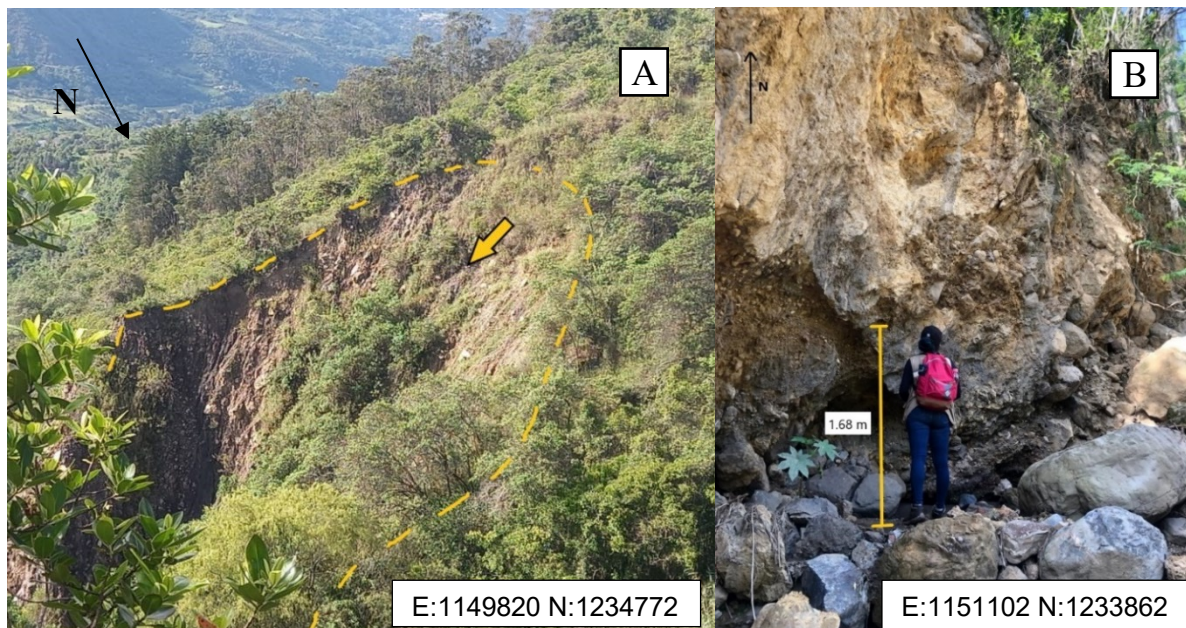
### 5.1.1 Estratigrafía

En este apartado se describen las principales unidades geológicas, cuya litología es de tipo sedimentaria. En el **Anexo 3** se resumen de forma general las estaciones cuyas coordenadas se encuentra en el SISTEMA MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ EPSG 3116, muestras, fotografías y demás datos tomados en el trabajo de campo que aportan a la descripción de la Formación Tibú-Mercedes y la Formación Rionegro.

#### 5.1.1.1 Depósitos cuaternarios

En la zona de estudio se identificaron y cartografiaron en su mayoría coluviones (Qc) (**Figura 3**), también se observaron aluviones (Qal), depósitos de terrazas (Qft) y suelos residuales arcillosos; estos depósitos fueron trazados no solo por datos tomados en campo sino también con ayuda de imágenes satelitales. Los depósitos cuaternarios afloran hacia las márgenes del Río Servitá y sus quebradas adyacentes (Aguablanca, Seca, y Aguapicha) (**Figura 6**).

**Figura 3.** (A). Visual de un depósito coluvión cubierto en la Vereda El Barzal. Fotografía FPB-01. (B). Afloramiento de un coluvión al margen del Río Servitá. Fotografía FPB-05.



### 5.1.1.2 Formación Tibú-Mercedes (Kitm)

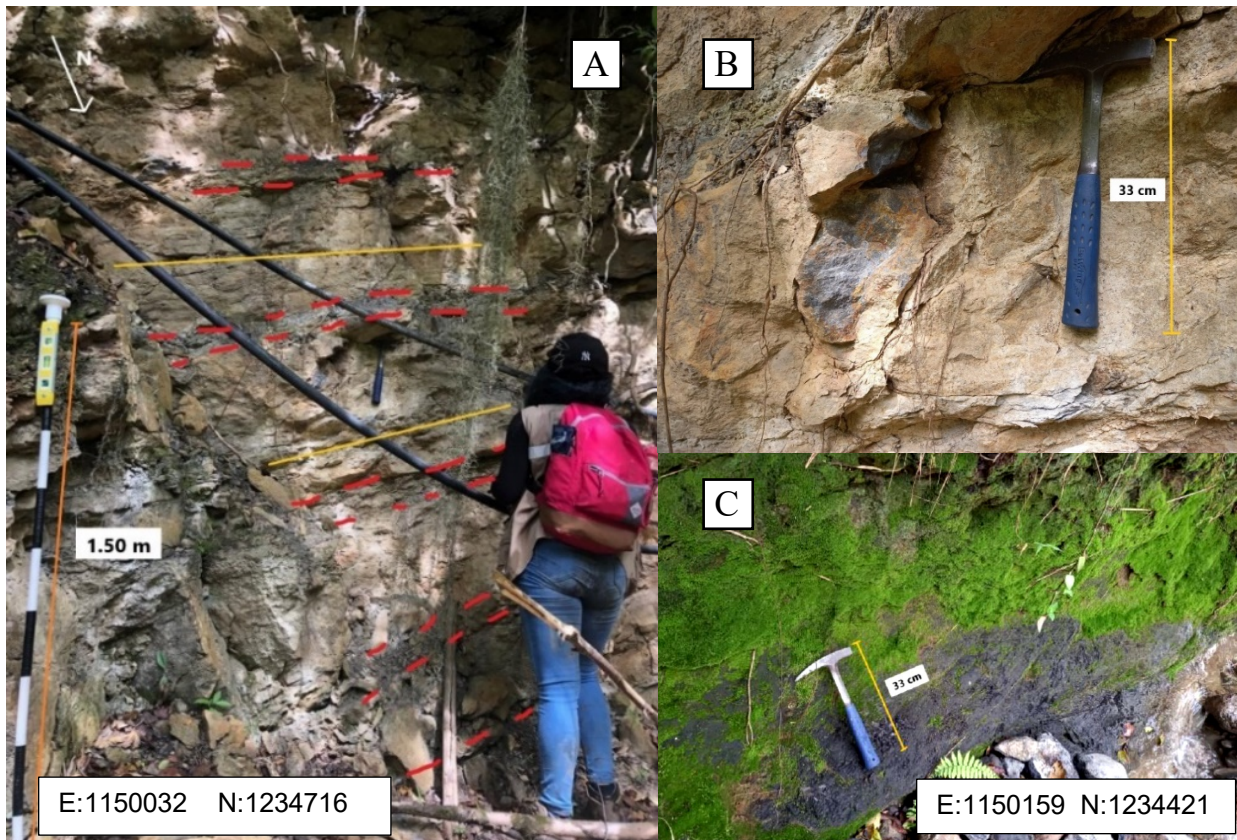
La Formación Tibú-Mercedes aflora principalmente a las márgenes del Río Servitá y es la unidad geológica predominante en la región, estructuralmente está afectada por la mayoría de las fallas principales, inclusive estas separan a la Formación Tibú-Mercedes con la Formación Rionegro, unidad a la que suprayace.

Los afloramientos observados y las muestras recolectadas de la Formación Tibú-Mercedes corresponden a los territorios de las veredas El Barzal y El Guásimo, cuya litología se compone básicamente de gruesas capas de calizas de tipo mudstone y wackestone (según la clasificación de *Dunham, 1962*) de color gris, algunas fosilíferas, con algunas intercalaciones más delgadas de lodolitas de color gris oscuro a negro, en algunas zonas estas son calcáreas, las rocas se encuentran afectadas por estructuras falladas. La Formación Tibú-Mercedes en la región muestra procesos de karstificación.

Como se puede observar en las fotografías FPB-02 y FPB-02C (**Figura 4**) la Formación Tibú-Mercedes presenta una estratificación plano-paralela (línea amarilla continua) con capas en forma tabular, intercaladas con lodolitas (línea roja discontinua), a pesar de que las rocas se encuentran bastante fracturadas es posible observar estas estructuras. De base a techo se muestran capas de caliza de 30 a 60 cm de espesor de color gris que pasan a tonalidades de amarillo claro al estar meteorizadas, con intercalaciones de lodolitas calcáreas (**Figura 4C**) de color gris medio de 10 a 30 cm. Los estratos de caliza se encuentran fracturados y bioturbados.

En el **Anexo 4** se puede apreciar mejor esa estratificación plano-paralela y la forma tabular de las capas de caliza en asociación con niveles lodosos, y el alto grado de fracturación y meteorización que presentan, lo que genera suelos tipo arcillosos de color amarillo.

**Figura 4.** (A). Capas de caliza con intercalaciones lodosas. (B) Capa de caliza de donde fue tomado la muestra MPB-01. (C). Capa de lodolitas calcáreas de color gris oscuro bioturbadas. Fotografías FPB-02 (A), FBP-02C (B) y FPB-03(C). A, B y C Fm Tibú-Mercedes.



En algunos lugares de la región debido a la alta presencia de cuerpos de agua, se observa procesos de karstificación en las calizas (**Anexo 7**), cuyas fracturas de gran tamaño pueden aumentar el grado de disolución de las rocas otorgándoles una considerable capacidad para almacenar agua, sin embargo, en la Formación Tibú-Mercedes (Kitm) las calizas se encuentran compactadas por lo que su permeabilidad es baja dejando una porosidad secundaria, por lo que se cree, que esas fracturas, fisuras y cavidades permiten el ingreso del agua que percola alcanzando y almacenándose en las areniscas de la Formación Rionegro (Kirn).

Para la clasificación de las rocas carbonatadas de las muestras correspondientes a esta formación (**Ver Anexo 5**) recolectadas en el trabajo de campo, se utilizó la clasificación según *Dunham, 1962* (**Ver Anexo 6**).

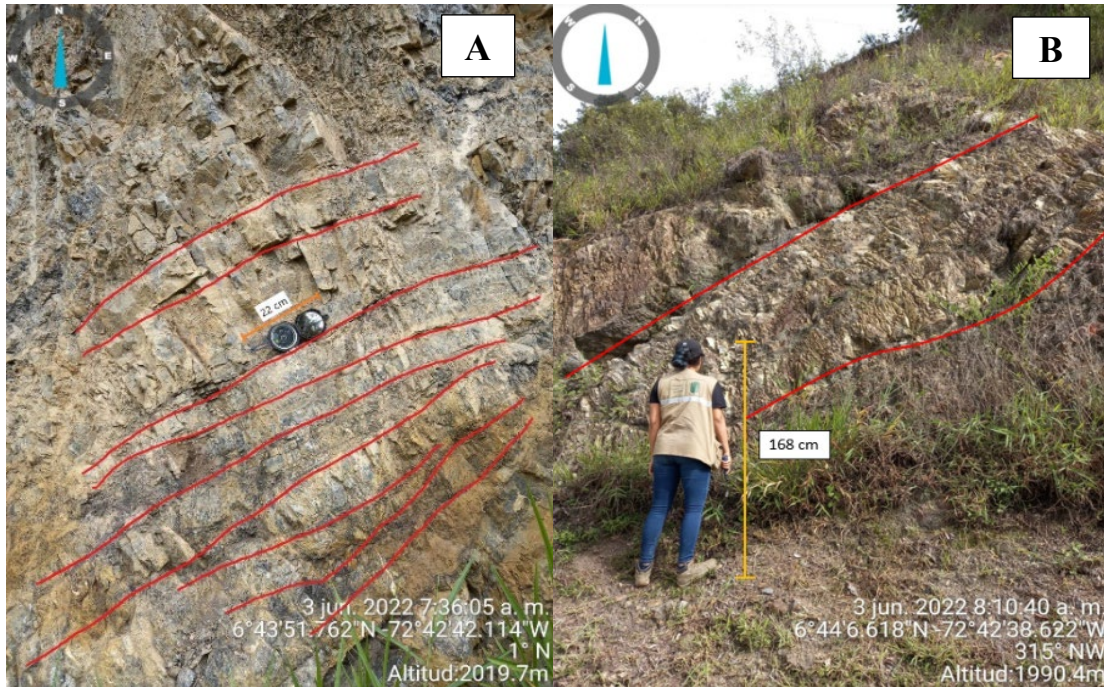
### **5.1.1.3 Formación Rionegro (Kirn)**

La Formación Rionegro aflora al norte de la zona de estudio, Vía Concepción-Málaga al margen derecho, solo en esta zona fue observada en el trabajo de campo la formación; sobre la vía se realizó la poligonal (**Ver Anexo 12**), y se identificó el contacto superior con la Formación Tibú-Mercedes. La Falla El Término separa a la Formación Rionegro con la Formación Capacho (Ksc). Su litología consta generalmente de capas de espesor variado de areniscas de grano fino a medio de color grisáceo con intercalaciones de lodolitas de color gris medio a oscuro fracturadas y plegadas debido a las estructuras falladas que afectan la zona.

Sobre la vía Concepción-Málaga se pudo observar que el contacto entre la Formación Tibú-Mercedes y la Formación Rionegro esta dado por la transición de lodolitas calcáreas de color gris oscuro a lodolitas siliciclásticas más claras (**Ver Anexo 8 y Anexo 9**), afectadas por fallas locales. En algunos sectores la laminación de las intercalaciones entre las areniscas y las lodolitas puede variar de plano paralela a cruzada, y también se observaron lentes de areniscas en niveles lodosos (**Figura 5**).

La permeabilidad de las areniscas identificadas varía debido al grado de compactación y a la cementación. En general las areniscas tienen porosidades medias y permeabilidades altas, algo que no ocurre con las lodolitas, estas rocas a pesar de tener porosidades altas presentan permeabilidades muy bajas.

**Figura 5.** (A y B) Capas de lodolitas y areniscas densamente fracturadas en forma de cuña de la Formación Rionegro. Fotografías FPB-09 (A) y FPB-17 (B).



La permeabilidad de las areniscas identificadas varía debido al grado de compactación y a la cementación. En general las areniscas tienen porosidades medias y permeabilidades altas, algo que no ocurre con las lodolitas, estas rocas a pesar de tener porosidades altas presentan permeabilidades muy bajas.

En la Formación Rionegro las areniscas pese a estar compactadas y cementadas con material silicio, factores que disminuyen su porosidad primaria, muestran una buena calibración de los granos y se encuentran bastante fracturadas originando una porosidad secundaria y aumentando la permeabilidad. Las lodolitas también presentan una alta fracturación por lo que pueden almacenar agua en las fisuras.

Para la clasificación de las areniscas se utilizó el diagrama triangular de clasificación composicional de *Folk (1974)* (**Ver Anexo 10**). La descripción de las muestras correspondientes a esta Formación Rionegro recolectadas en el trabajo de campo se puede observar en el **Anexo 11**.

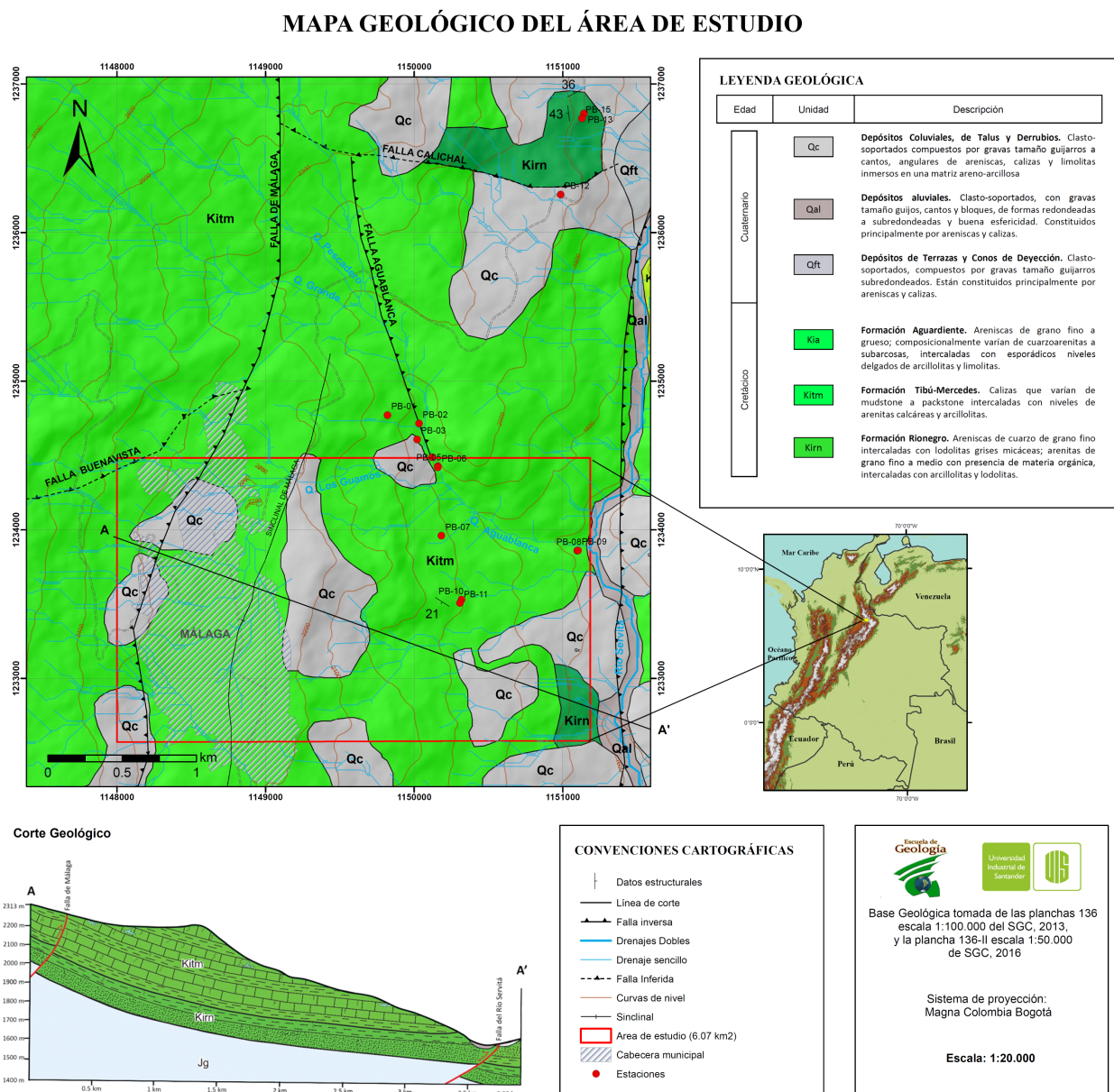
### 5.1.2 Geología Estructural

La zona de estudio se ubica en un área afectada por estructuras de considerable extensión asociadas a esfuerzos compresivos y originadas por la actividad tectónica presente en el Macizo de Santander. Según las regiones estructurales definidas por *Royero y Clavijo (2001a)* para el departamento de Santander, la zona de estudio se encuentra en la región oriental, caracterizada por fallas con rumbo N-S y NE-SW, pliegues sinclinales y anticlinales estrechos (*SGC, 2016*). Las fallas y pliegues se cartografiaron gracias a la revisión de trabajos previos sumado a la interpretación de imágenes satelitales y el DEM.

La estructura principal de la zona es la Falla del Río Servitá con dirección NNE-SSW, cinemática inversa y vergencia al E, que ha sido interpretada como una falla profunda de alto ángulo que se desprende de la flor positiva de tipo siniestral que genera la falla de rumbo de Bucaramanga (*Velandia et al., 2020*), esta estructura afecta a todas las formaciones que componen la geología de la región y controla el Río Servitá, el cuerpo de agua principal de Málaga y alrededores. La mayoría de las fallas son inversas con componente de rumbo. La falla de Málaga presenta una dirección casi N-S, las fallas Calichal y Buenavista en dirección W-E, mientras que la Falla El Término está dispuesta en sentido NW-SE. Localmente se encuentra el Sinclinal de Málaga cuyo eje pasa por la mitad del casco urbano del municipio de Málaga finalizando su tramo en San José de Miranda.

La **Figura 6** es el resultado final de la cartografía geológica de la zona de estudio a escala 1:20.000, en donde se evidencia las unidades que afloran, las principales estructuras, drenajes, curvas de nivel, estaciones y datos estructurales recolectados en el trabajo de campo. La **Figura 7** es la columna estratigráfica realizada sobre la vía Concepción-Málaga margen derecha, que fue realizada a partir de la poligonal (**Ver Anexo 12**).

**Figura 6.** Mapa geológico y estructural de la zona de estudio.





### 5.1.3 Geomorfología

De forma general, en la zona de estudio predominan las geoformas de origen morfoestructural, que se originan por la expresión morfológica y la acción de las diferentes fallas encontradas dentro del área de estudio, entre las cuáles se destaca la Falla del Río Servitá, en relación con diferentes estructuras plegadas (sinclinales, anticlinales y homoclinales), como en este caso lo es el Sinclinal de Málaga. La unidad que abarca la mayor parte del área de estudio corresponde a la **Cuesta (Sc)**, que se define como una sierra elongada, de morfología colinada, con un suave basculamiento de los estratos que la conforman (*SGC, 2014*). Esta unidad se encuentra principalmente asociada a la formación Tibú-Mercedes (Kitm) y en menor medida a la Formación Rionegro (Kirn), ambas del Cretácico. Por otro lado, se tiene la unidad denominada **Cornisa estructural (Scor)**, que se define como una saliente estructural de morfología alomada o tabular, suavemente inclinada, que se presenta colgada a manera de repisa en laderas generalmente irregulares o escalonadas de contrapendiente (*SGC, 2014*). Esta unidad se encuentra localizada en cercanías de la cabecera municipal de Málaga, asociada a la Formación Tibú – Mercedes (Kitm).

En segundo lugar, se encuentran las geoformas que se originan gracias a procesos denudativos, en donde la ubicación geográfica de la zona y sus características climáticas, e incluso la intervención humana juegan un papel importante. En primer lugar, se tiene el **Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco)**, que corresponde a una unidad que se origina por procesos de transporte gravitacional y acumulación de materiales, conformando depósitos de ladera hacia la base de esta. Esta unidad se puede encontrar asociada a los depósitos coluviales, de talud y derrubios (Qc) del cuaternario. La segunda geoforma más representativa de este ambiente corresponde al **Escarpe de erosión mayor (Deem)**, que es definida por la presencia de escarpes verticales a subverticales que presentan longitud moderada, de forma típicamente recta y

pendientes que varían entre escarpadas a muy escarpadas (SGC, 2014). Esta unidad se puede encontrar asociada a las Formaciones Tibú-Mercedes (Kitm) y Aguardiente (Kia) del Cretácico.

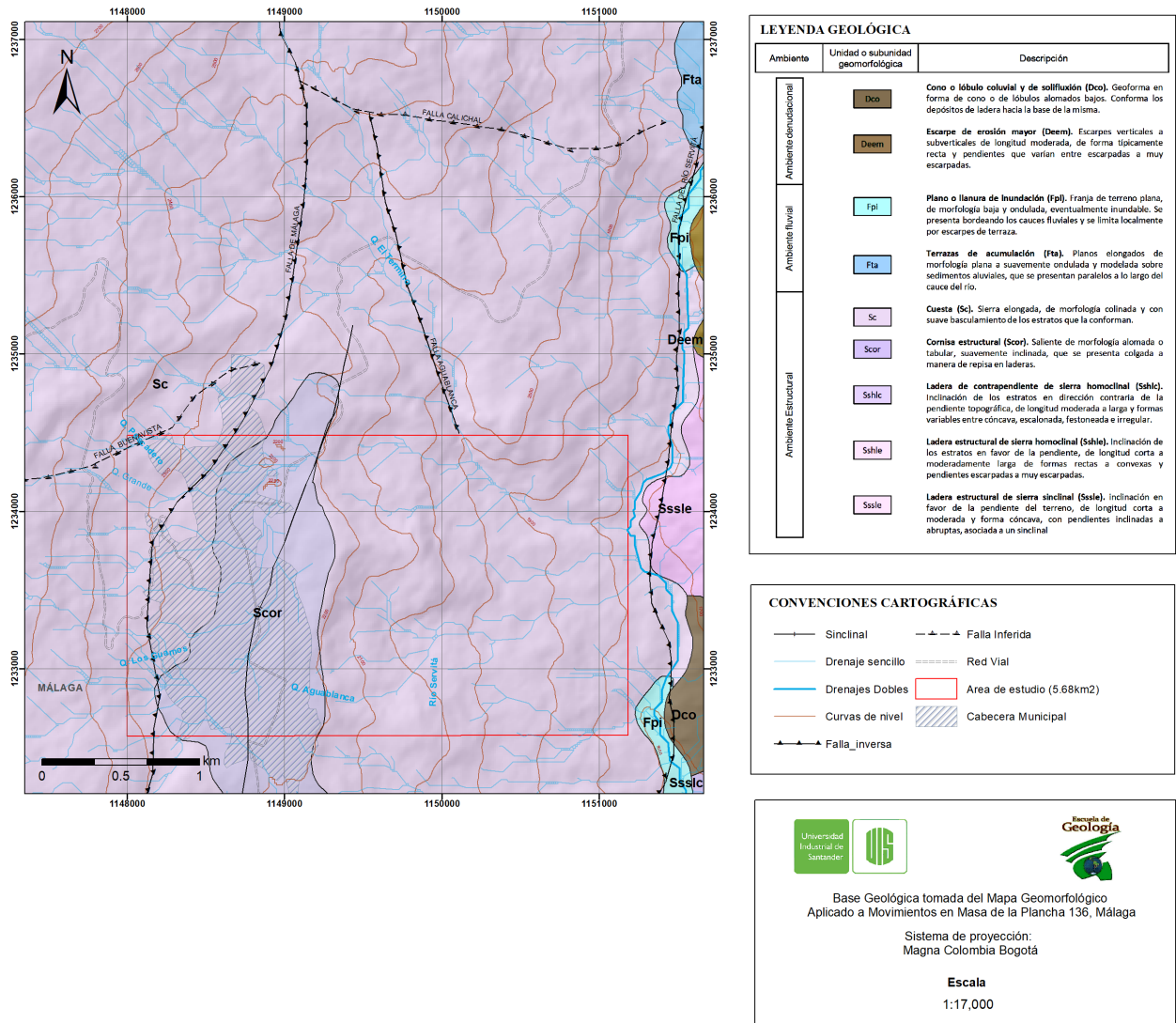
Finalmente, se identifican algunas geoformas correspondientes a un ambiente de tipo fluvial, asociadas al Río Servitá, que es el drenaje de mayor importancia dentro del área, cuyo cauce va siguiendo en gran parte de su extensión el trazo de la Falla del Río Servitá. Como unidad más representativa de este ambiente se tiene el **Plano o llanura de inundación (Fpi)**, que corresponde a una franja de terreno plana, de morfología baja y ondulada, eventualmente inundable. Se presenta bordeando los cauces fluviales y se limita localmente por escarpes de terraza (SGC, 2014). Esta unidad se puede encontrar asociada a los depósitos aluviales (Qal) del cuaternario. Y por último se tienen las **Terrazas de acumulación (Fta)**, estas se encuentran representadas por planos elongados de morfología plana a suavemente ondulada y modelada sobre sedimentos aluviales, que se presentan en forma pareada a lo largo del cauce del río al cual limitan, exhibiendo a su vez escarpes de diferentes alturas (SGC, 2014). Esta unidad está asociada a los depósitos de terrazas y conos de deyección (Qft).

Toda la definición de la geomorfología se realizó tomando como principal referencia el Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa de la plancha 136 de Málaga realizado por el Servicio Geológico Colombiano en convenio con la Universidad Industrial de Santander (SGC, 2014).

La **Figura 8** es la representación gráfica de la geomorfología presente en el área de estudio, allí se resumen los ambientes y las unidades geomorfológicas correspondientes (geoformas) con su debida descripción.

Figura 8. Mapa Geomorfológico del área de estudio.

MAPA GEOMORFOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO



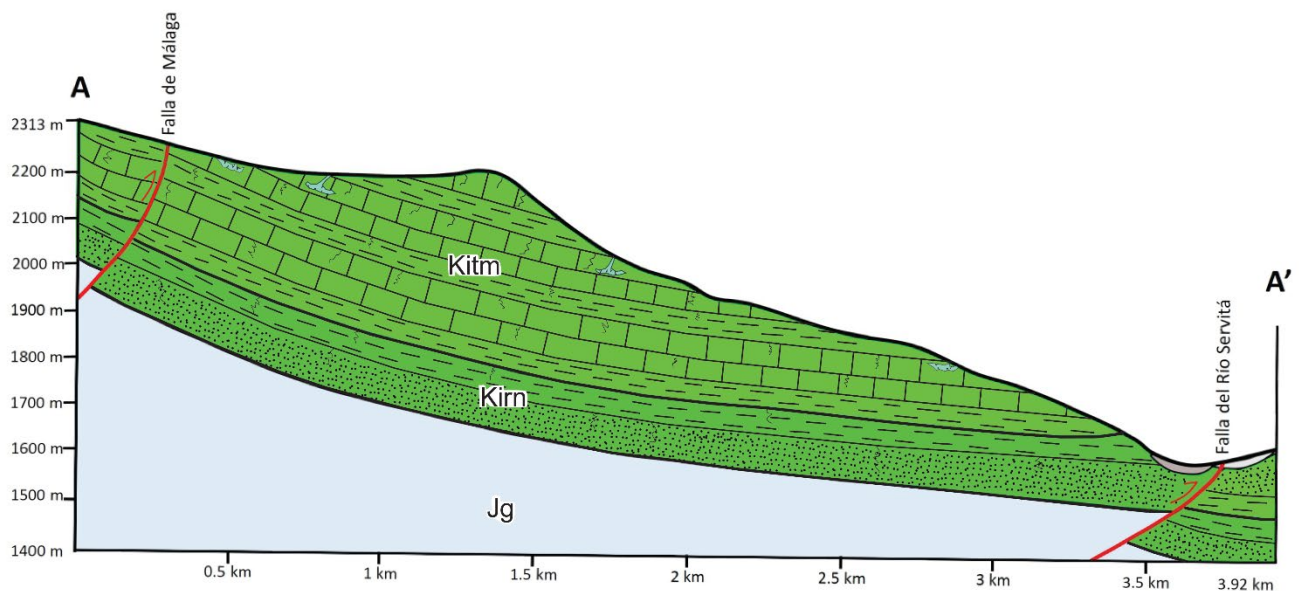
## 5.2 Modelamiento Geofísico

### 5.2.1 Construcción del modelo sintético del subsuelo

Los modelos sintéticos son aproximaciones de la realidad geológica del subsuelo en términos de la respuesta física de los materiales a la inyección de corriente (*Vanegas & Ospina, 2020*).

El objetivo de realizar el modelo sintético de resistividad eléctrica que es obtenido a partir del perfil geológico de la zona, es que se pueda estudiar de forma teórica la respuesta de la corriente en los materiales geológicos que componen el subsuelo de la zona de estudio mediante diferentes métodos geoelectrónicos, y así proceder con la inversión e interpretación correspondiente, lo anterior con el fin de determinar el método más adecuado para el estudio junto con los mejores criterios para llevar a cabo la adquisición de datos en campo.

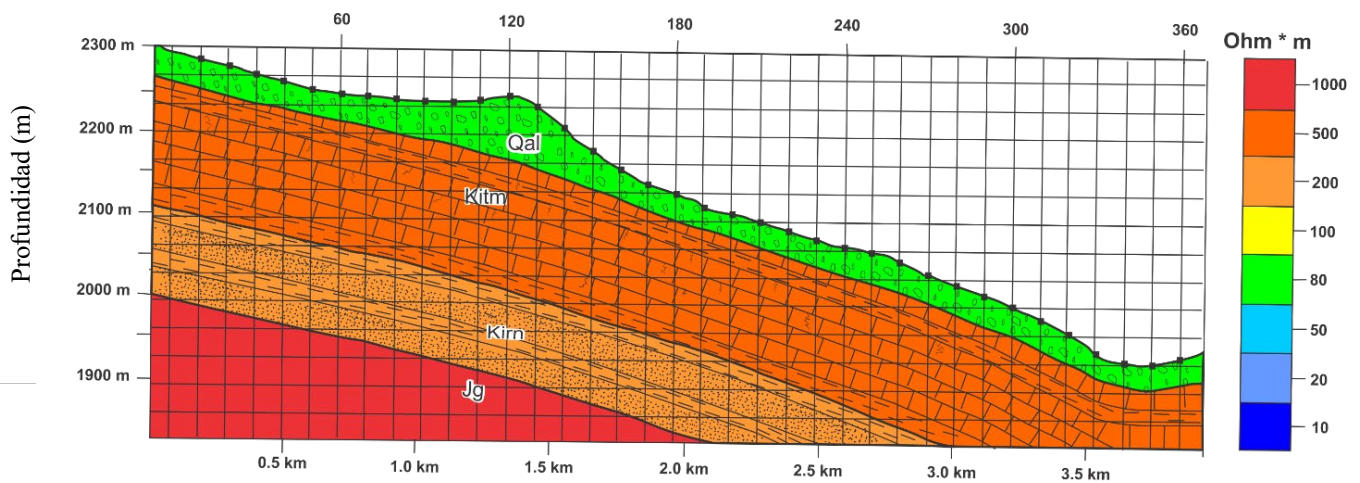
**Figura 9.** Perfil geológico del área de estudio.



Para la construcción del modelo sintético primero se realizó la construcción del perfil geológico (**Figura 9**) teniendo en cuenta las características hidrológicas de la zona, la topografía se obtuvo del DEM utilizado para la generación del mapa geológico y su ilustración fue realizada en el software COREL DRAW. Luego de la obtención del perfil geológico, se llevó a cabo una recopilación de información extraída de diferentes fuentes sobre los rangos de resistividad eléctrica para las litologías presentes en la zona de estudio (**Tabla 1**), donde se promediaron los valores obtenidos de diferentes autores para cada litología con el fin de obtener un valor de resistividad más representativo.

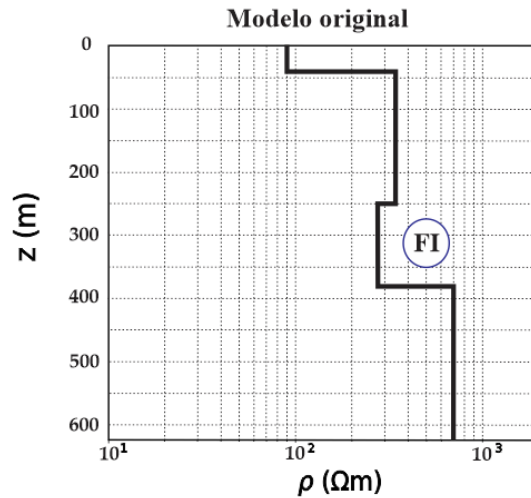
**Tabla 1.** Tabla de rangos de resistividad eléctrica para las litologías presentes en la zona de estudio según diferentes autores.

Rangos de resistividades para la litología presente en el área de estudio ( $\Omega \cdot m$ )								
Litología		Suárez (2021)	Rincón (2020)	Incitem a (2019)	Cadena (2015)	Loke (2012)	Universidad Nacional (2000)	Promedio
Depósitos Cuaternarios	Saturado	14 - 20	< 20					90
	Húmedo	21 - 85	20 -150	-	-	-	-	
	Seco	241	> 150					
Calizas	Fracturada Saturada	10 - 330	20 - 400					340
	Fracturada Húmeda	193	400 - 600	-	-	80 - 7000	-	
	Compacta Seca	680 - 800	> 600					
Lodolitas	Saturadas	-	-				5 - 100	70
	No Saturadas	-	-	-	-	1 - 100	30 -200	
Areniscas	Saturadas	-	-		50 -150		100 - 200	280
	No Saturadas	-	-	-	150 -350	10 - 5000	400 -700	
	Saturadas	-	-					
Formación Girón		-	-	300 - 1500	-	-	-	700

**Figura 10.** Perfil de resistividad eléctrica del área de estudio.

### 5.2.2 Generación de los modelos teóricos

Los modelos teóricos son generados a partir del modelo sin variación de resistividades y espesores de las unidades que conforman el subsuelo de la zona de estudio (Ver Anexo 13 y Anexo 13) cuyos valores fueron obtenidos del perfil de resistividad eléctrica (Figura 10) generado en el apartado anterior, y corresponden a modelos similares pero con algunas variaciones, donde en primer lugar se variaron únicamente los valores de las resistividades (Figura 12), y en segundo lugar se hicieron cambios en el espesor y en algunos casos de la resistividad (Figura 13); todo con el fin de representar los diferentes escenarios que se podrían presentar durante la adquisición de datos en campo, y ser posteriormente evaluados en la fase de modelamiento para determinar el método geoelectrico que presente un mejor ajuste ante las condiciones planteadas.

**Figura 11.** Modelo teórico sin variación de espesor o de resistividad.

En los modelos teóricos generados con variaciones únicamente en la resistividad (**Ver Anexo 13 y Figura 12**), los modelos 1 y 2 simulan condiciones altas e intermedias de saturación y fracturamiento de las unidades preexistentes representados con valores de resistividad inferiores. Por otro lado, los modelos 3 y 4 simulan condiciones secas y de escaso fracturamiento con valores de resistividad superiores.

En los modelos teóricos con variaciones en los espesores (**Figura 13 y Ver Anexo 15**), al igual que en los de resistividades, se pretendió representar diferentes escenarios que simulan condiciones altas e intermedias de saturación y fracturamiento de las unidades preexistentes (modelo 3), además de condiciones secas y poco permeables (modelo 4), y también se incluyeron niveles intermedios que se podrían registrar durante la adquisición geoelectrica, todo esto con el fin de presentar un panorama amplio de los escenarios que se pueden obtener en campo y evaluar la respuesta de dichos método.

Figura 12. Modelos teóricos con variación de la resistividad

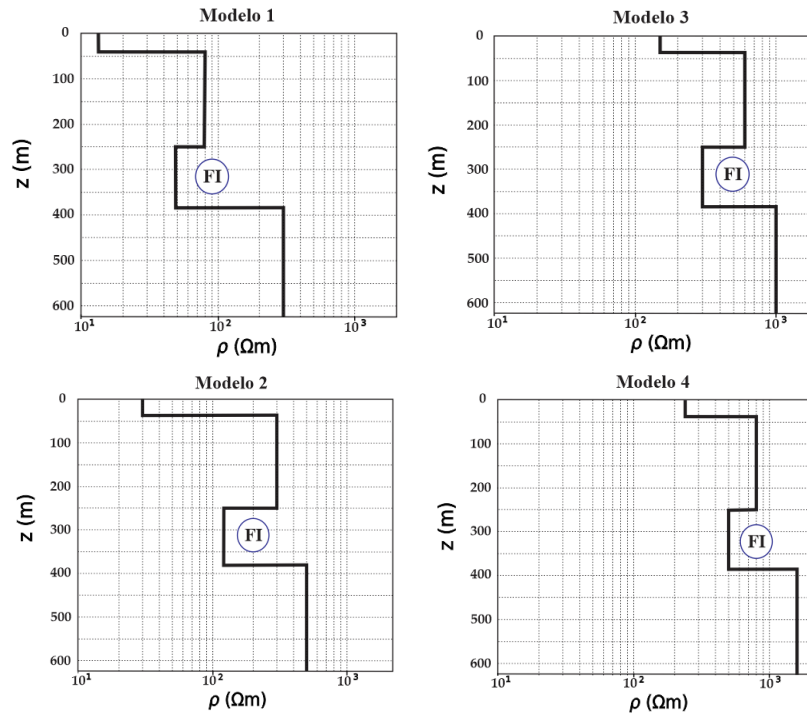
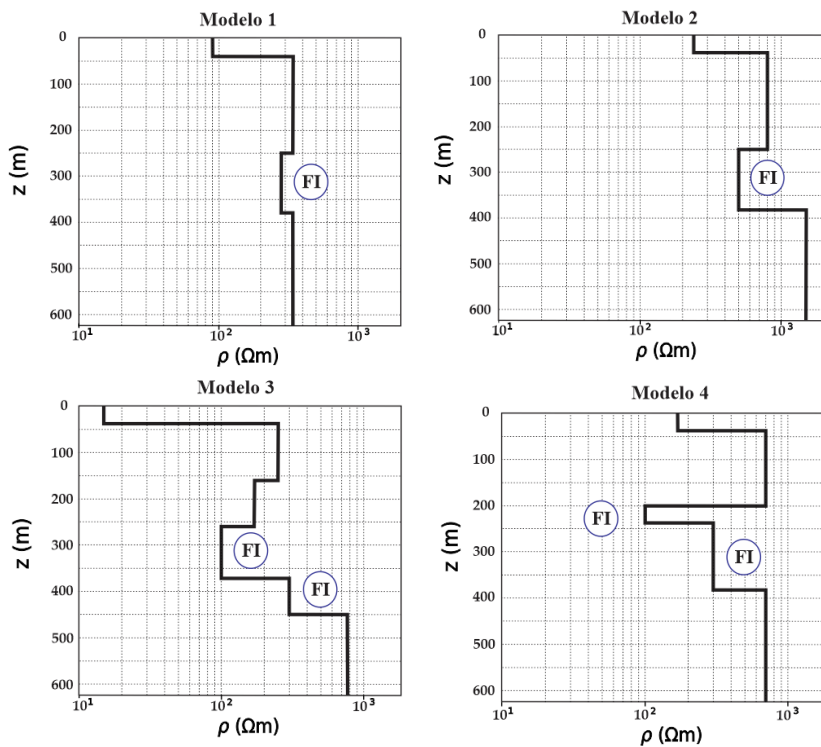


Figura 13. Modelos teóricos con variación de espesor.

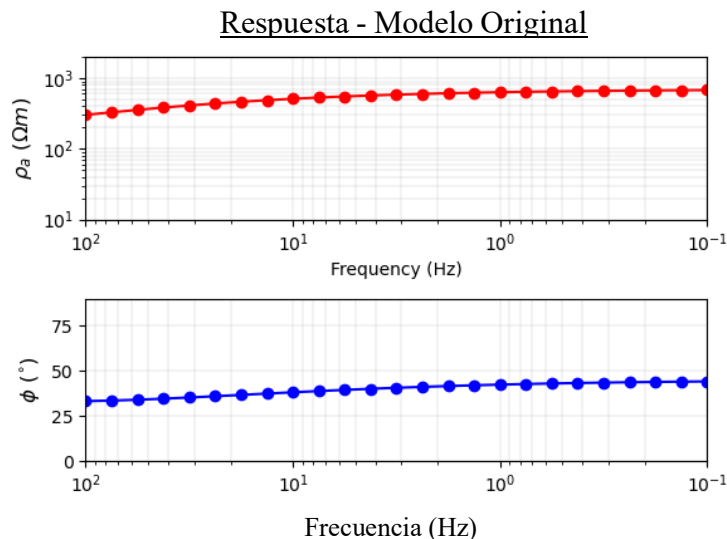


Nota: Las siglas **FI** significan *Formación de interés*.

### 5.2.3 Modelamiento con el método Magnetotelúrico

En este apartado, el modelamiento directo magnetotelúrico 1D se realizó por medio de la utilización de un código en Python<sup>3</sup> desarrollado por *Andrew Pethick (2013)*. Se usaron como datos de entrada los parámetros de resistividad y el espesor de los modelos teóricos propuestos en el apartado anterior (**Figura 12 y Figura 13**), y se estableció el rango de frecuencia ( $10^{-1} - 10^2$  Hz) del equipo STRATEGEM EH4, el cual está a disposición del Laboratorio de Geofísica UIS. Luego de introducir los valores de resistividad y espesor de los modelos teóricos planteados previamente en el código, se obtuvieron como respuesta las curvas de resistividad aparente y fase vs la frecuencia para cada caso, como se puede apreciar en la **Figura 14**, donde se puede observar la respuesta obtenida para el modelo base.

**Figura 14.** Curvas de resistividad aparente y fase vs frecuencia, obtenida con el modelo teórico sin variación de la zona de estudio.



<sup>3</sup> Modelamiento e inversión:

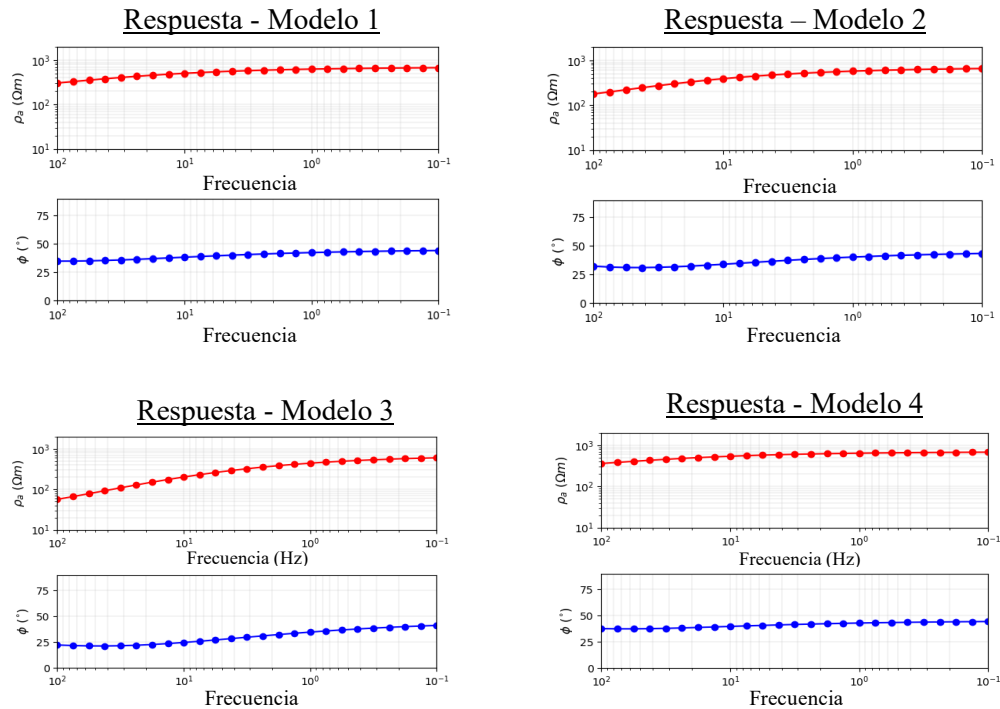
[https://github.com/seg/tutorials-2017/blob/master/1708\\_Nonlinear\\_inversion/3\\_MT1D\\_5layer\\_inversion.ipynb](https://github.com/seg/tutorials-2017/blob/master/1708_Nonlinear_inversion/3_MT1D_5layer_inversion.ipynb)

De forma general, las curvas obtenidas no muestran dispersión en sus valores. Asimismo, presentan un ángulo de fase inicial inferior a  $45^\circ$ , lo que quiere decir que se presenta un aumento de la resistividad con respecto a la profundidad, y conforme van disminuyendo los valores de frecuencias se presenta un incremento progresivo de este ángulo, lo cual puede ser debido a algunas variaciones intermedias de niveles de resistividad menor asociado a los niveles de la Formación Rionegro que son de menor resistividad en contraste con la Formación Tibú – Mercedes.

Las curvas de resistividad aparente generadas a partir de los modelos con variaciones en los espesores de las unidades que conforman el subsuelo de la zona de estudio, se puede evidenciar que no presentan un contraste significativo que permita identificar las diferentes litologías, ya que como se observa en los modelos 1 y 4 (**Figura 15**), se asemejan a un modelo 1D de una sola capa y la respuesta no alcanza a registrar las unidades de menores resistividades y espesores, como lo son los depósitos y algunos niveles menos resistivos lodosos de las unidades, tomando únicamente valores del orden de  $10^2$ , lo que traduce que en esas situaciones este método arrojaría un modelo que no representa con claridad la distribución de las unidades del subsuelo en la zona de estudio.

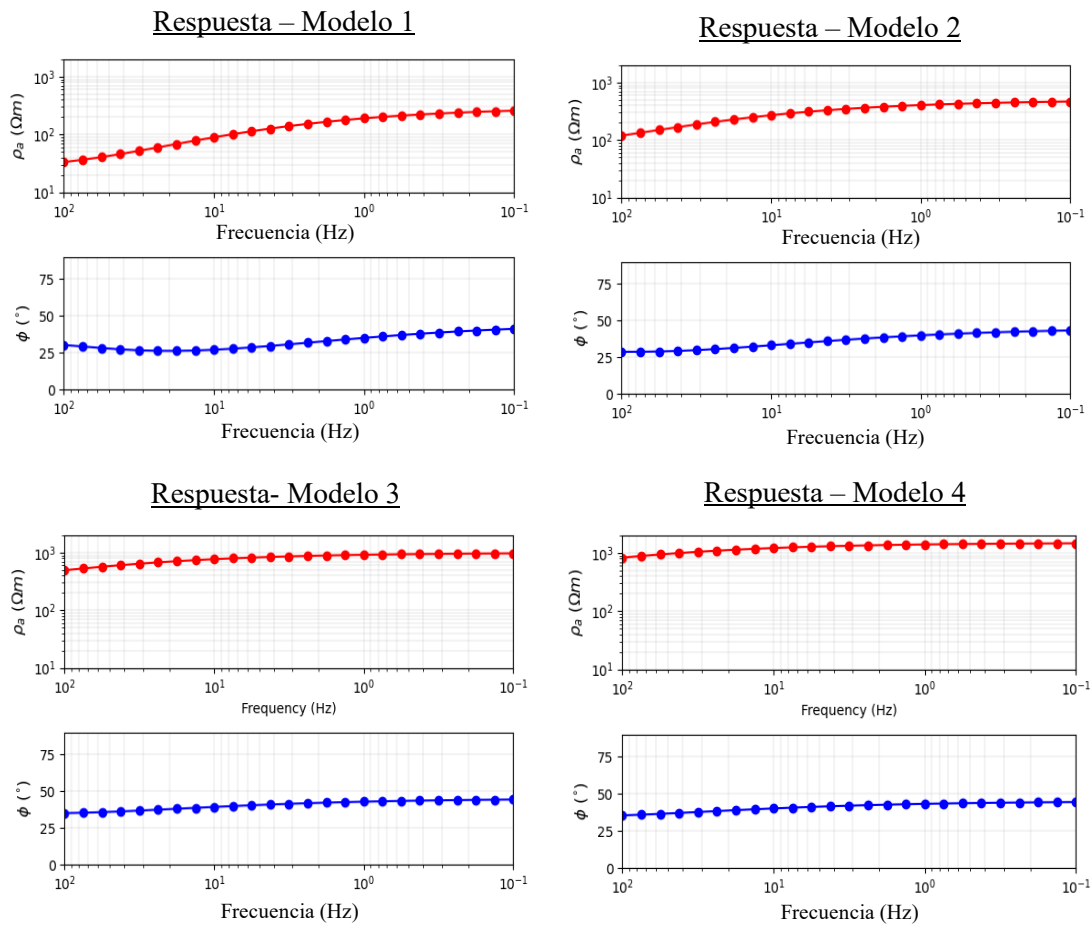
Sin embargo, en el modelo 3 (**Figura 15**) se puede apreciar un ligero contraste en la curva, donde en este caso si se registran las unidades de resistividades del orden de  $10^1$  y de menor espesor, por lo cual podría resultar factible la inversión de este modelo para apreciar la resolución del método conforme a la distribución del método y analizar los resultados.

**Figura 15.** Curvas de resistividad aparente y fase vs frecuencia, obtenidas a partir del modelamiento 1D con los modelos teóricos de variación de espesores.



Con respecto a las curvas de resistividad aparente obtenidas a partir de los modelos con variación de resistividades (**Figura 16**), se puede evidenciar un comportamiento similar al caso anterior, donde en la mayoría de los casos no se están tomando las capas menos resistivas, lo que no permite diferenciar todas las litologías presentes en la zona de estudio. En este caso únicamente en el Modelo 1 se presenta una mejor diferenciación de las unidades menos resistivas para la inversión y el posterior análisis del modelamiento.

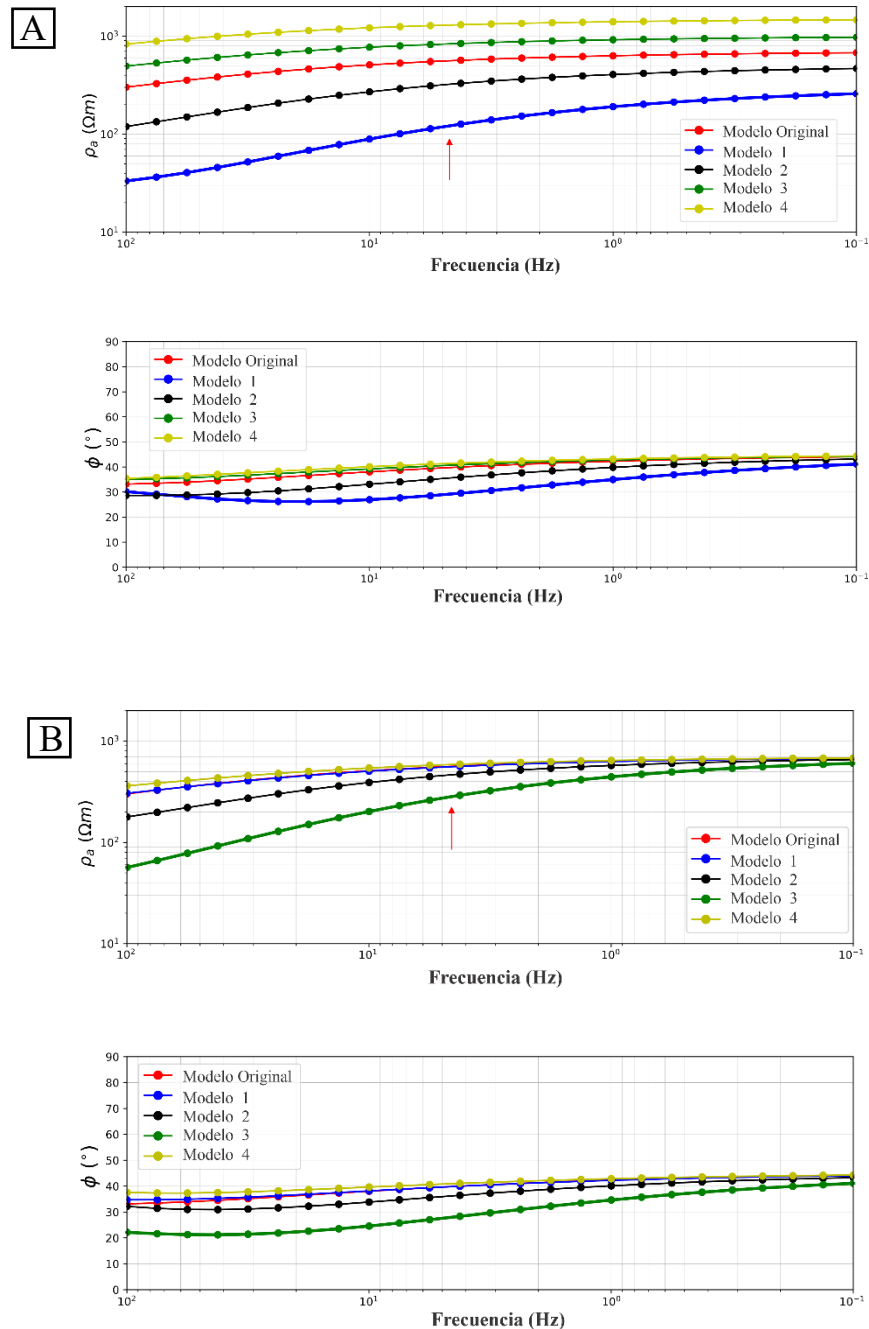
**Figura 16.** Curvas de resistividad aparente y fase vs frecuencia, obtenidas a partir del modelamiento 1D con los modelos teóricos de variación de las resistividades.



En la **Figura 17** se realizó una comparación de todas las curvas de resistividad aparente generadas en los dos casos anteriores, donde es posible evidenciar que las curvas no presentan un cambio significativo, exceptuando el modelo 1 de la Sección A y el modelo 3 en la sección B. Estos resultados se pueden atribuir a la problemática de la unicidad y resolución del modelo propuesto, conocido como problema de equivalencia (no unicidad), que es inherente a todos los métodos geofísicos, donde en algunos casos se puede presentar cierto rango de variación de los espesores y resistividades, y la curva de resistividad aparente no presenta modificaciones

asemejándose a un modelo de una capa, lo que puede generar grandes inconvenientes en la interpretación.

**Figura 17.** Curvas de resistividad aparente y fase vs frecuencia, obtenidas a partir del modelamiento 1D con los modelos teóricos de variación de las resistividades (A) y espesores (B) de las unidades preexistentes.



### 5.2.3.1 Inversión con el método Magnetotelúrico

Para la resolución del problema inverso existen códigos de uso común y fácilmente accesibles para el modelado 1-D del método magnetotelúrico, en este caso se utilizó un código de libre acceso desarrollado en Python<sup>4</sup> y un paquete de Python de código abierto para simulación y estimación de parámetros basados en gradientes en aplicaciones geofísicas, conocido como SimPEG.

Igual que en el apartado anterior, se usaron como datos de entrada los parámetros de resistividad y el espesor de los modelos teóricos propuestos (**Figura 14 y Figura 15**) y se estableció el rango de frecuencia ( $10^{-1} - 10^2$  Hz) del equipo STRATEGEM EH4, el cual está a disposición dentro del Laboratorio de Geofísica UIS. Además, dentro del código se estableció una máxima profundidad de alcance de 1500 m de extensión de la región central de la malla para obtener mayor resolución en las partes más someras.

En la **Figura 18** se pueden evidenciar los resultados de la inversión que no presentan variación al ingresar los diferentes modelos planteados, donde se observó que no se registran las unidades más superficiales y las curvas de la inversión no se ajustan al modelo real. En la **Figura 18(A)**, se comparan dos parámetros de regularización: una inversión 'Suave' (Smooth), que penaliza grandes pendientes mostrando tendencias generales; y una inversión 'Pequeña' (Small) que favorece modelos que están cerca del modelo de referencia con pendientes más fuertes. Con ambos parámetros de inversión es claro observar que las curvas no registran valores semejantes a la capa de interés, que en este caso es la formación Rionegro. Luego de esto, en la **Figura 18(B)**, se realizó una inversión con un rango mayor de frecuencias donde fue posible evidenciar que en si

---

<sup>4</sup> Modelamiento e inversión:

[https://github.com/seg/tutorials-2017/blob/master/1708\\_Nonlinear\\_inversion/3\\_MT1D\\_5layer\\_inversion.ipynb](https://github.com/seg/tutorials-2017/blob/master/1708_Nonlinear_inversion/3_MT1D_5layer_inversion.ipynb)



#### 5.2.4 Modelamiento con el método Sondeos Eléctricos Verticales

El modelamiento correspondiente a este método se realizó por medio de un código de programación en el lenguaje de Python, el cual se puede encontrar en la librería de Pygimli<sup>5</sup> (*PyGIMLi, 2021*), una librería multimétodo de código abierto para el modelado y la inversión en geofísica. Se usaron los datos de espesores y resistividades de los modelos teóricos, descritos anteriormente, además se estableció el parámetro principal de este método,  $AB/2$ ; según el equipo a disposición, el ABEM Terrameter SAS 1000, dicho parámetro  $AB/2$  máximo es de 750 m.

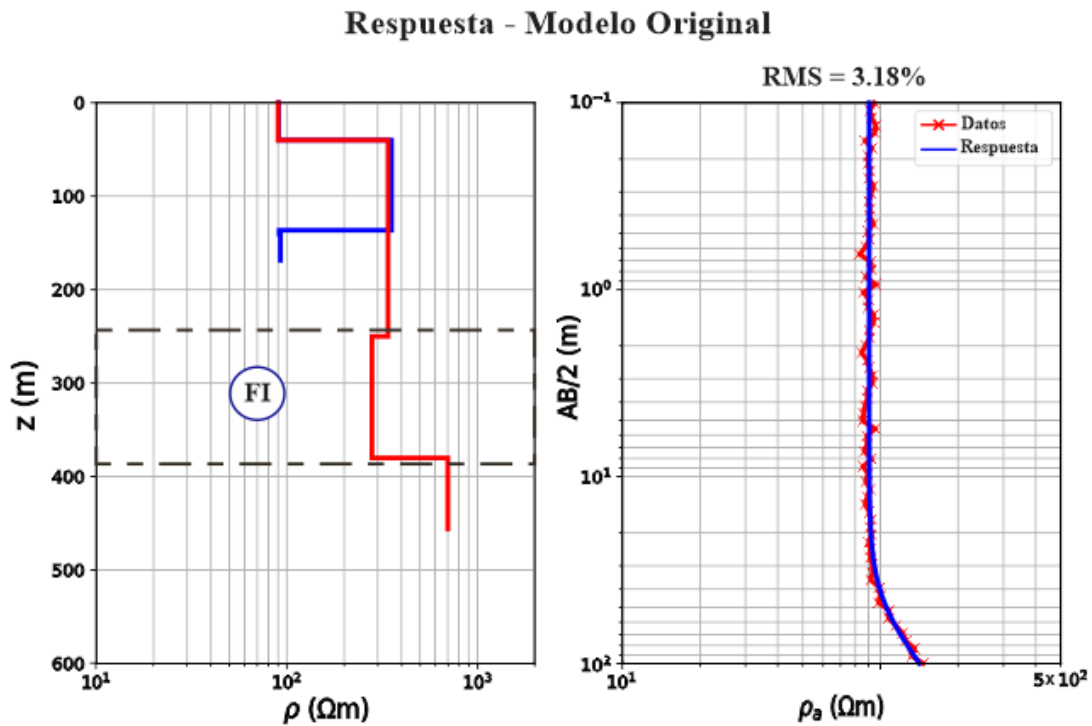
La representación del modelamiento es un modelo por bloques para la inversión de los Sondeos Eléctricos Verticales. En las siguientes figuras, el gráfico de la izquierda (en azul) muestra las distintas profundidades y resistividades resultantes de las capas de subsuelo obtenidas a partir de los modelos teóricos, mientras que el gráfico de la derecha, en rojo se observan las resistividades eléctricas medidas dadas por la ley de Ohm para diferentes distancias entre los electrodos A y B, y en azul, el modelo directo resultante de la inversión, en el que se contrastan las resistividades aparentes y longitud  $AB/2$ , además se puede observar el error cuadrático medio (RMS). Por lo cual, el modelo más adecuado y, por ende, más eficaz para aplicarlo en campo de acuerdo a los parámetros y configuraciones propuestas, es aquel que cumpla con el mínimo error, representado por la cercanía de los datos a la curva de respuesta (línea azul).

La **Figura 19** es la respuesta al modelo original o sin variación de resistividad o de espesor.

---

<sup>5</sup> Para más información sobre el código: [https://www.pygimli.org/\\_tutorials\\_auto/3\\_inversion/plot\\_2-dc1dblock.html](https://www.pygimli.org/_tutorials_auto/3_inversion/plot_2-dc1dblock.html)

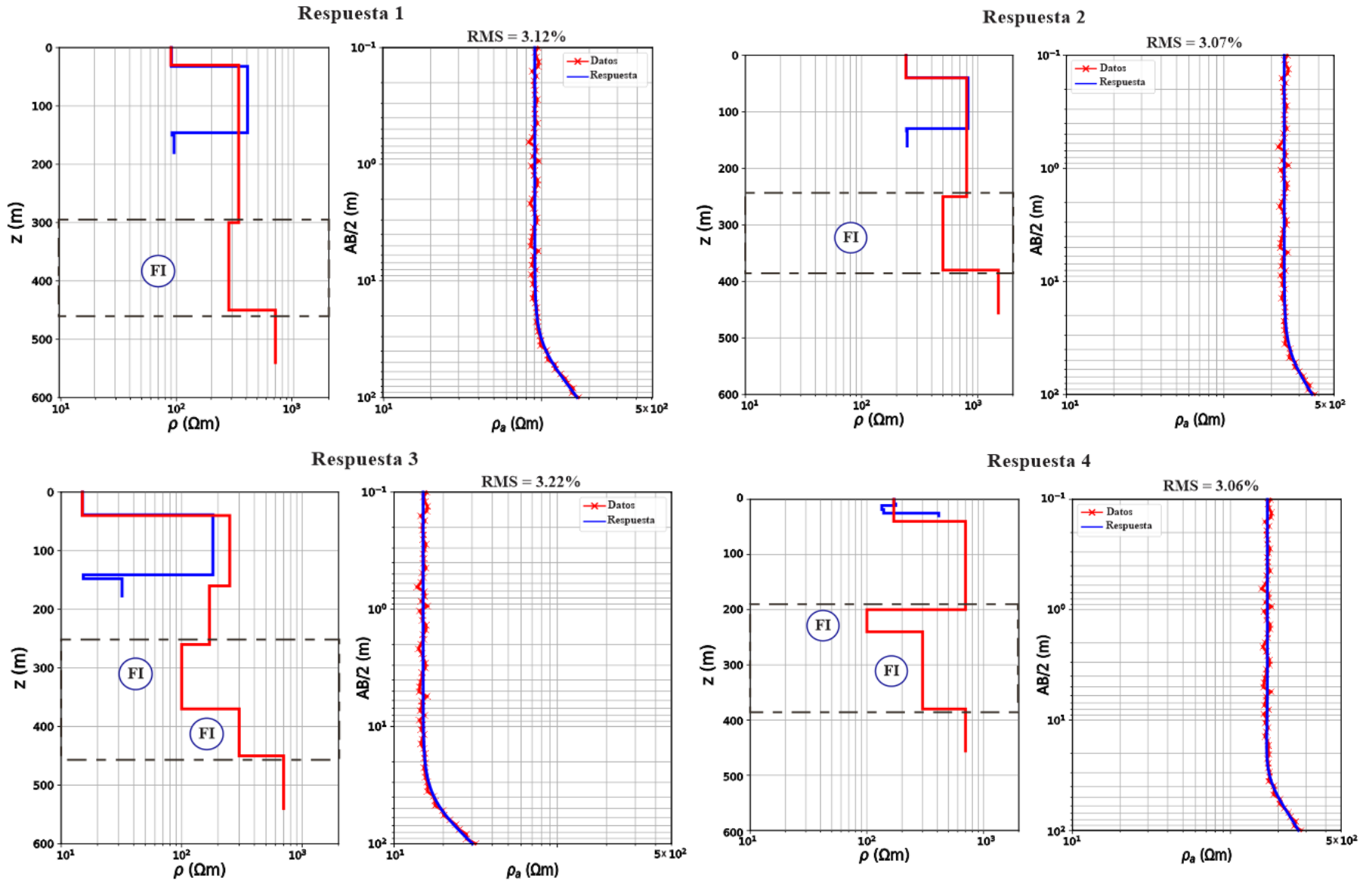
**Figura 19.** Curvas de resistividad vs profundidad (izquierda), y resistividad aparente vs AB/2 (derecha) del modelo teórico original.



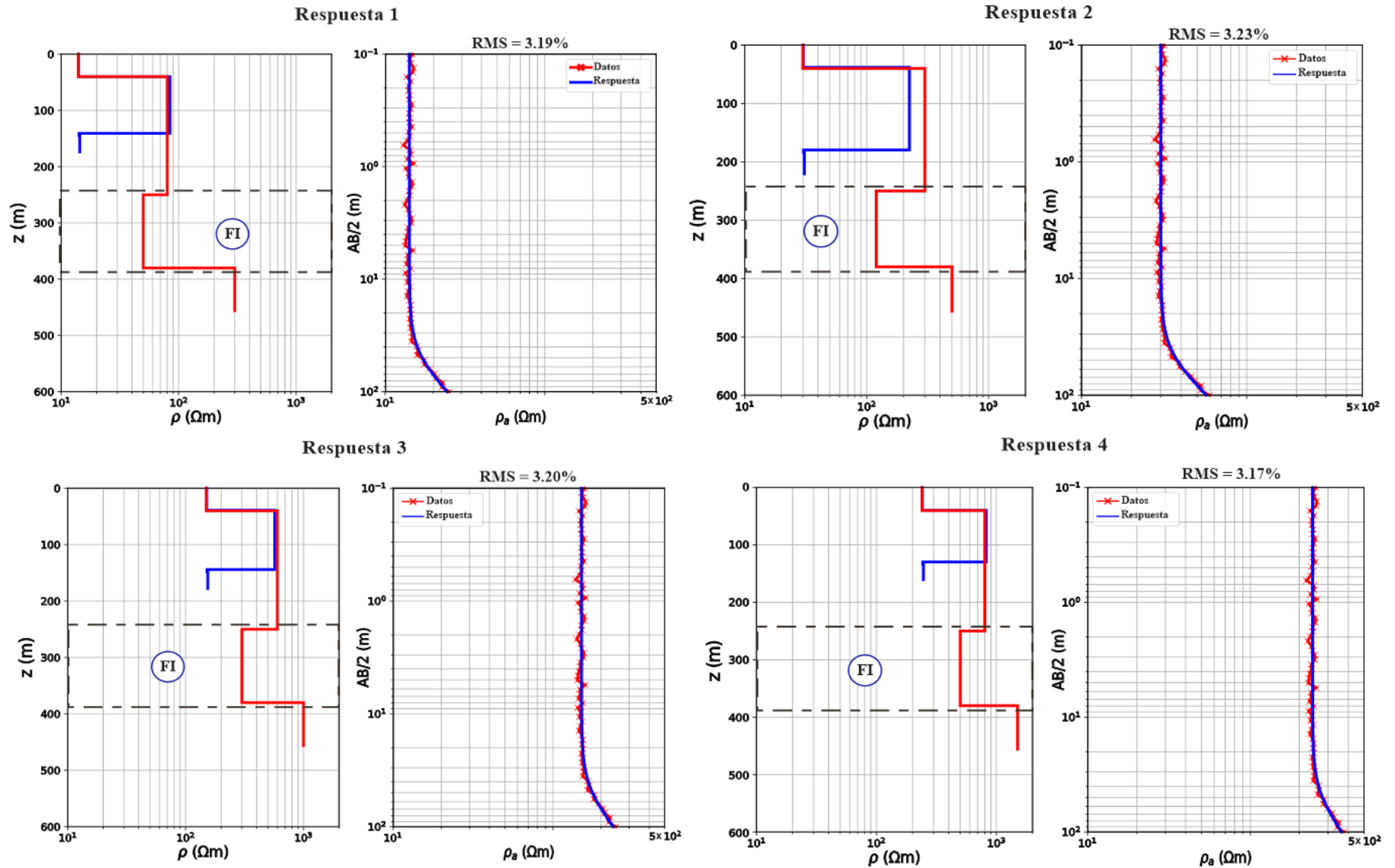
Nota: Las siglas *FI* significan Formación de Interés.

En la **Figura 20** se muestran las respuestas de los modelos teóricos con variación en el espesor de las capas del subsuelo del área de estudio, mientras la **Figura 21** son las respuestas de los modelos teóricos con variación en la resistividad.

**Figura 20.** Curvas de resistividad vs profundidad (izquierda), y resistividad aparente vs AB/2 (derecha) de los modelos teóricos con variación de espesor.



**Figura 21.** Curvas de resistividad vs profundidad (izquierda), y resistividad aparente vs AB/2 (derecha) de los modelos teóricos con variación de resistividad.



Como se pudo observar en la **Figura 20** y la **Figura 21**, la aplicación de este método alcanzaría una profundidad de aproximadamente 180 m según el equipo a disposición (ABEM Terrameter SAS 1000) y la configuración, esto indicaría que la adquisición de datos llegaría hasta una parte de la Formación Tibú-Mercedes, por lo que este método no se ajustaría para el presente trabajo, en el que se espera penetrar hasta las primeras capas de la Formación Rionegro, cuya profundidad oscilaría entre los 300 y 400 m, asimismo, se pudieron identificar errores muy bajos, aproximadamente del 3%, lo que haría acorde el método con el equipo del ABEM Terrameter SAS 1000 junto con la configuración propuesta, si el objetivo del trabajo fuese la Formación Tibú-Mercedes.

### **5.2.5 Modelamiento con el Método Electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM)**

El modelamiento correspondiente a este método se realizó por medio de dos códigos de programación en el lenguaje de Python, los cuales encuentran en la librería SimPEG<sup>67</sup>, y como su nombre lo indica se trata de un paquete de Python para simulación y estimación de parámetros basada en gradientes en el contexto de aplicaciones geofísicas (*Cockett et al., 2015*). Se usaron los datos de espesor y de conductividad (inverso de la resistividad) para las distintas capas. El equipo a disposición en la Escuela de Geología es el ABEM-WalkTEM.

En las siguientes figuras, los gráficos de la parte superior corresponden a una simulación directa para un solo sondeo en capas 1D; el de la izquierda es la definición de un modelo terrestre en capas 1D usando los datos de espesor y conductividad de las distintas capas para cada modelo teórico mostrado anteriormente; el gráfico de la derecha es la simulación, que da como respuesta la predicción de los datos en el sondeo TDEM, se observa una curva de flujo magnético. Los

---

<sup>6</sup> Código simulación directa: [https://docs.simpeg.xyz/content/tutorials/08-tdem/plot\\_fwd\\_1\\_em1dtm.html](https://docs.simpeg.xyz/content/tutorials/08-tdem/plot_fwd_1_em1dtm.html)

<sup>7</sup> Código inversión: [https://docs.simpeg.xyz/content/tutorials/08-tdem/plot\\_inv\\_1\\_em1dtm.html](https://docs.simpeg.xyz/content/tutorials/08-tdem/plot_inv_1_em1dtm.html)

gráficos de la parte inferior son las respuestas a la inversión 1D para datos del dominio del tiempo para un solo sondeo, para la inversión se tuvieron en cuenta los datos obtenidos de la curva de flujo magnético anterior; la gráfica de la izquierda es un modelo de capas junto con un modelo de conductividad eléctrica y el de la derecha da como resultado los datos observados y predichos en la inversión.

La **Figura 22** es la respuesta al modelo original o sin variación de resistividad o de espesor.

La **Figura 23** son las respuestas a los modelos teóricos con variación de espesor, y la

**Figura 24** son las respuestas a los modelos teóricos con variación de resistividad.

**Figura 22.** Simulación directa e inversión 1D del modelo teórico sin variación de resistividad o de espesor.

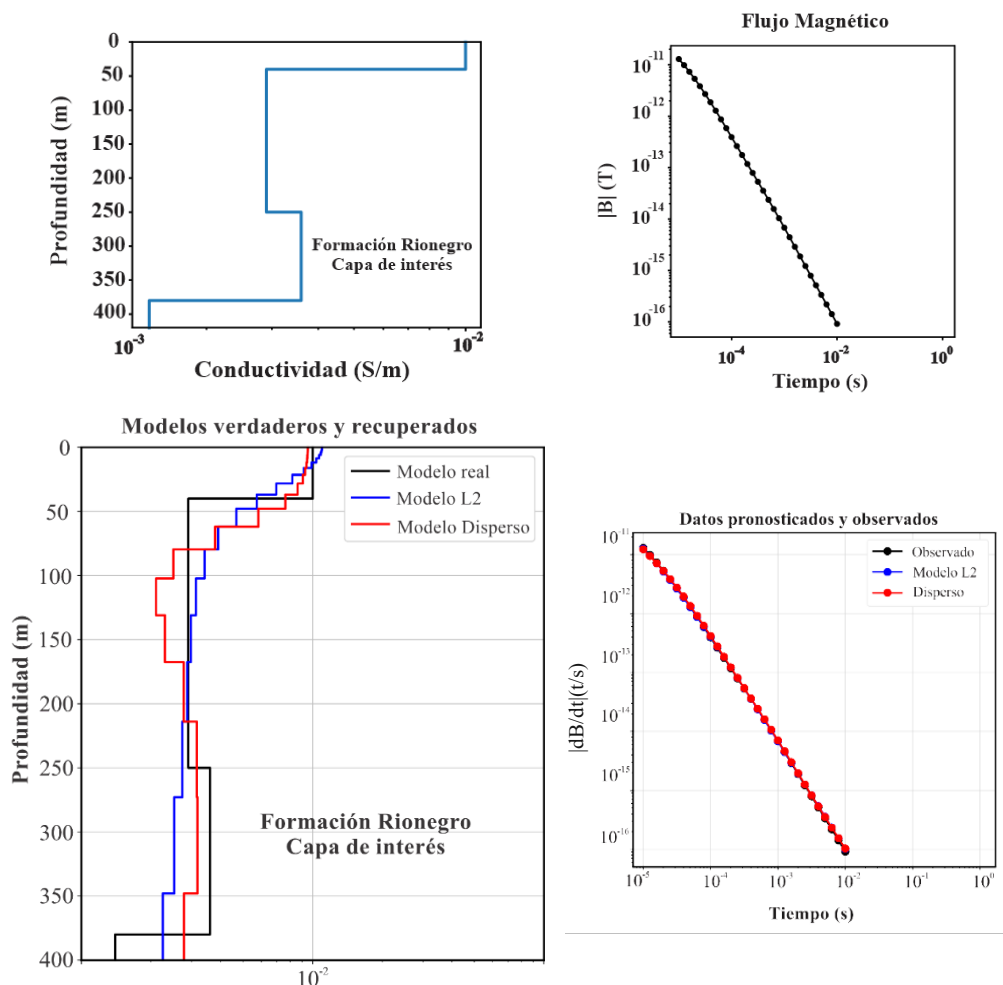


Figura 23. Simulación directa e inversión 1D de los modelos teóricos con variación de espesor.

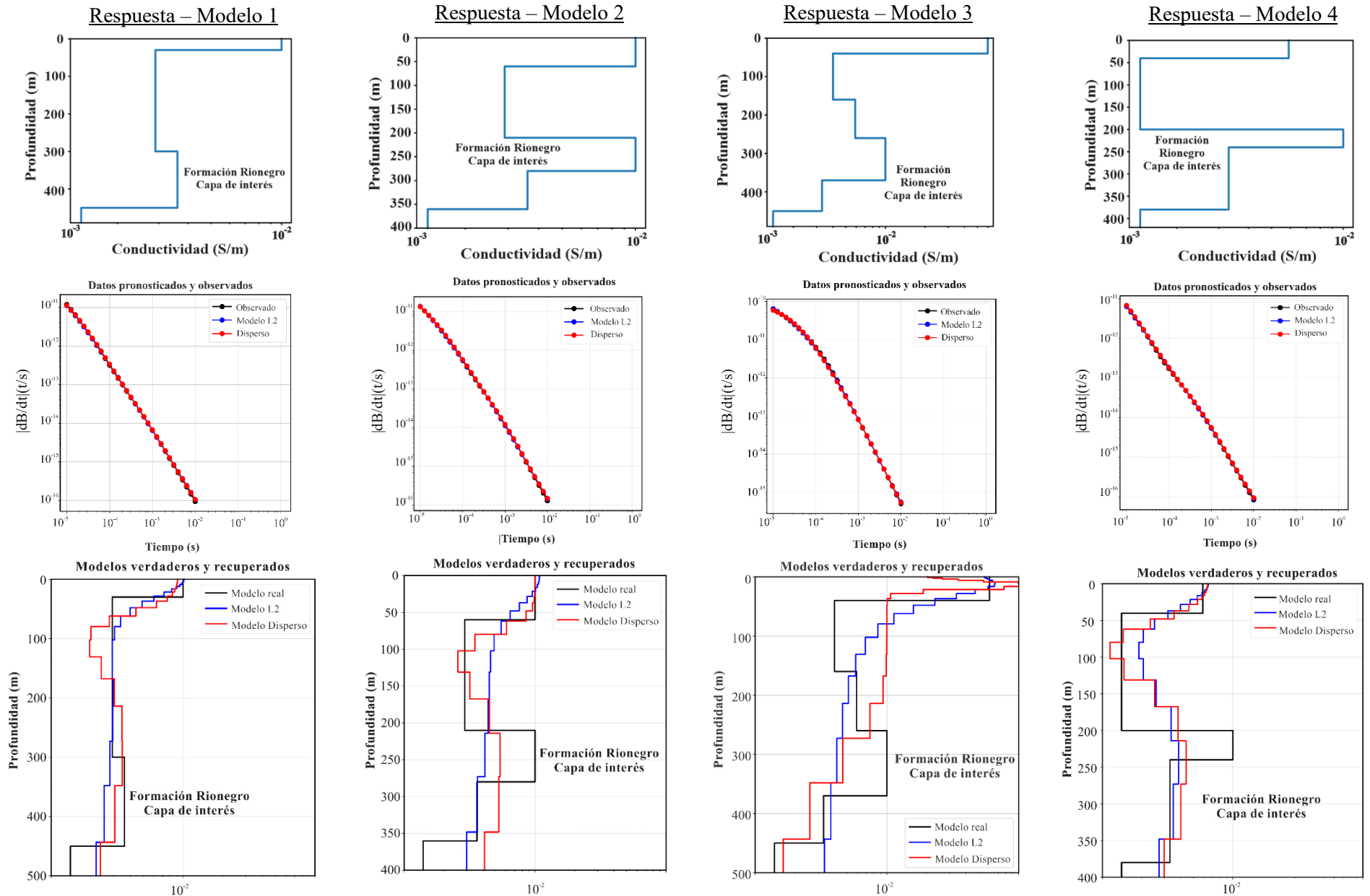
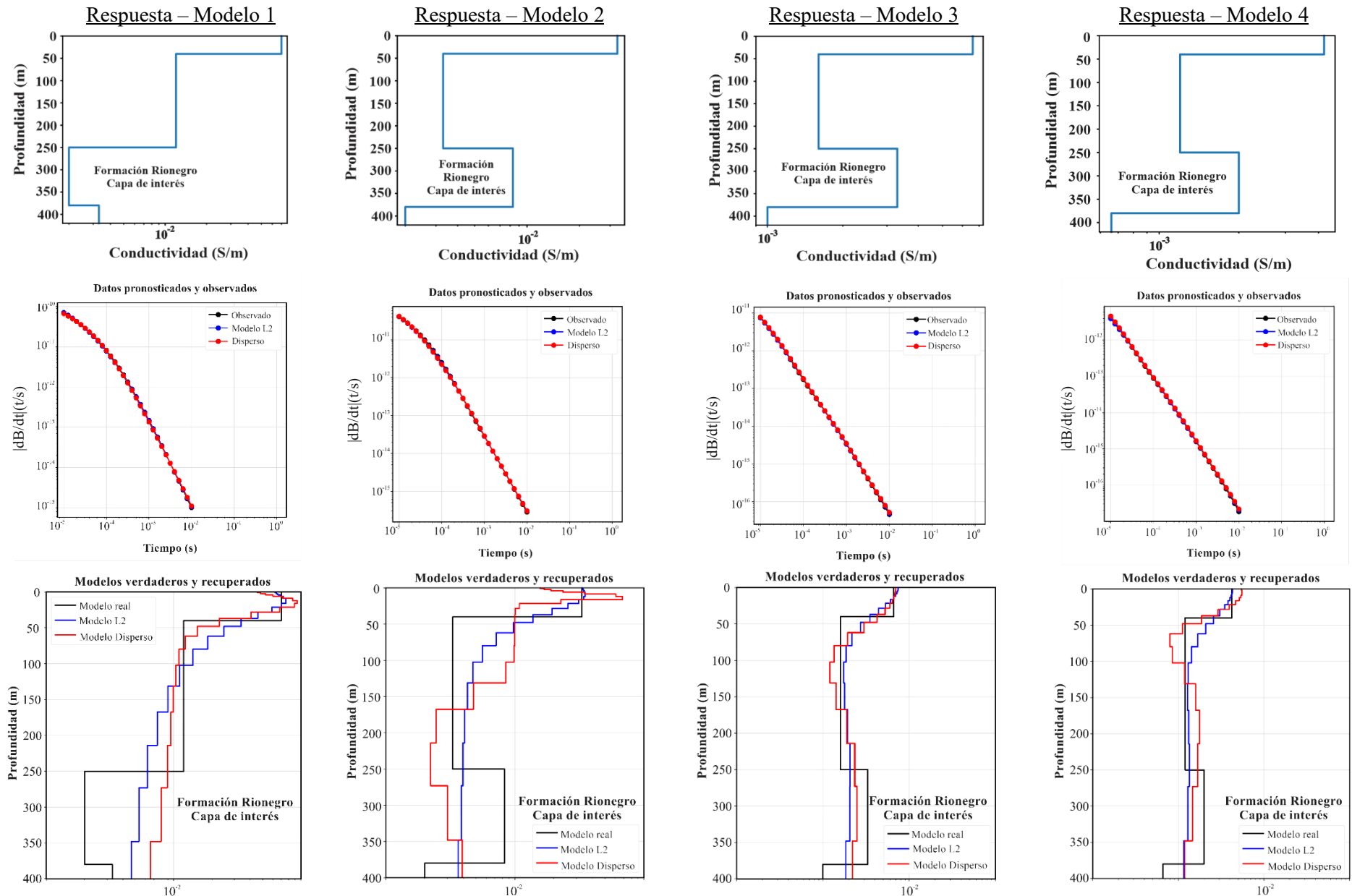


Figura 24. Simulación directa e inversión 1D de los modelos teóricos con variación de resistividad.



De acuerdo con las figuras anteriormente mostradas, la aplicación de este método (TDEM) usando el equipo a disposición (ABEM Walk-TEM), alcanzaría en todos los modelos planteados las profundidades de la unidad objetivo (250 m – 400 m), que corresponde a la Formación Rionegro. Por otro lado, en las curvas de regresión de ‘Datos pronosticados y observados de forma general se puede evidenciar que presentan un buen ajuste con los datos observados, lo que da a entender un bajo porcentaje de error en los resultados.

Las curvas resultantes de la inversión que se observan en los ‘Modelos verdaderos y recuperados’, son consideradas anomalías presentes en las capas, que pueden corresponder a la posible presencia o no de un fluido, en este caso, de agua. Se logró evidenciar que en los modelos 1 y 4 de cambios de espesores (**Figura 23**), las curvas resultantes de la inversión presentan un buen ajuste con el modelo real, específicamente con la capa de interés que representa la formación Rionegro; y en los modelos 3 y 4 de cambios de resistividad (**Figura 24**) también se observó un ajuste similar de dichas curvas.

Con base en los resultados obtenidos en el modelamiento del método TDEM, se puede concluir que este es el método más adecuado para la exploración geofísica y determinación de la vocación acuífera en la Formación Rionegro, ya que alcanza la profundidad y los datos necesarios para determinar que en las primeras capas de la formación hay presencia de agua, cumpliendo así, con el objetivo y los resultados de la inversión de los diferentes modelos planteados presentan muy buen ajuste con el modelo real. del presente trabajo.

### 5.2.6 Análisis comparativo de los métodos geofísicos planteados

**Tabla 2.** Matriz comparativa de los métodos geofísicos trabajados.

<b>Método Geofísico</b>	<b>Resolución</b>	<b>Alcance Profundidad</b>	<b>Lectura</b>	<b>Uso equipos</b>	<b>Porcentaje de error</b>
<b>MT</b>	Regular (Limitado por el rango de frecuencias)	1000 a 2000 metros	Fácil	Complejo	Alto
<b>SEV</b>	Buena.	Medio (limitado por el AB/2 máximo disponible)	Fácil	Fácil	Bajo
<b>TDEM</b>	Muy buena	250 a 300 metros	Fácil	Medio	Bajo

Teniendo en cuenta los resultados de la **Tabla 2**, se puede concluir que , para llevar a cabo el objetivo principal del presente trabajo, el cual se basa en la Exploración de Aguas Subterráneas en los niveles superiores de la Formación Rionegro mediante la interpretación de perfiles de resistividad, el Método Electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM) más idóneo para implementar en campo de acuerdo a su muy buena resolución y su alto alcance de profundidad, según las condiciones geológicas de la zona de trabajo.

### **5.3 Adquisición y procesamiento de Sondeos Electromagnéticos en el dominio del Tiempo (TDEM).**

En este capítulo se realizó la descripción de la metodología de las adquisiciones de los sondeos TDEM en campo, su localización y procesamiento e interpretación, donde finalmente se obtuvieron los modelos geológicos 1D de la zona de estudio, los cuales, permitieron caracterizar satisfactoriamente los miembros superiores de la formación Rionegro y definir su vocación acuífera.

Las adquisiciones fueron realizadas con el equipo WalkTEM de ABEM, perteneciente a la Escuela de Física UIS. Este se compone de un transmisor de alta corriente (Antena transmisora TX) con 160 m de largo, dos modelos de bobina de receptor de bajo ruido, uno optimizado para sondeos superficiales de alta resolución (Antena Receptora Rc-5) y el otro con un área efectiva más grande, adecuado para sondeos más profundos (Antena receptora Rc-200) de 40 m de largo. También cuenta con resistencias para uso junto con la bobina transmisora,  $1.5 \Omega$  para ser utilizado como resistencia en serie y  $330 \Omega$  para ser utilizado como paralelo resistencia de amortiguación (**Figura 25**). La unidad WalkTEM cuenta con una PC integrada con un sistema operativo Windows XP Pro, y un aplicativo asociado WalkTEMUI, junto con un GPS. Para acceder a la computadora es posible utilizar un mouse y un teclado externo conectado a los conectores USB de la unidad. El transmisor, incorporado en la consola WalkTEM, se alimenta mediante una batería incorporada de 8Ah 12V. Finalmente, la consola cuenta con una fuente externa de alimentación de 12 V.

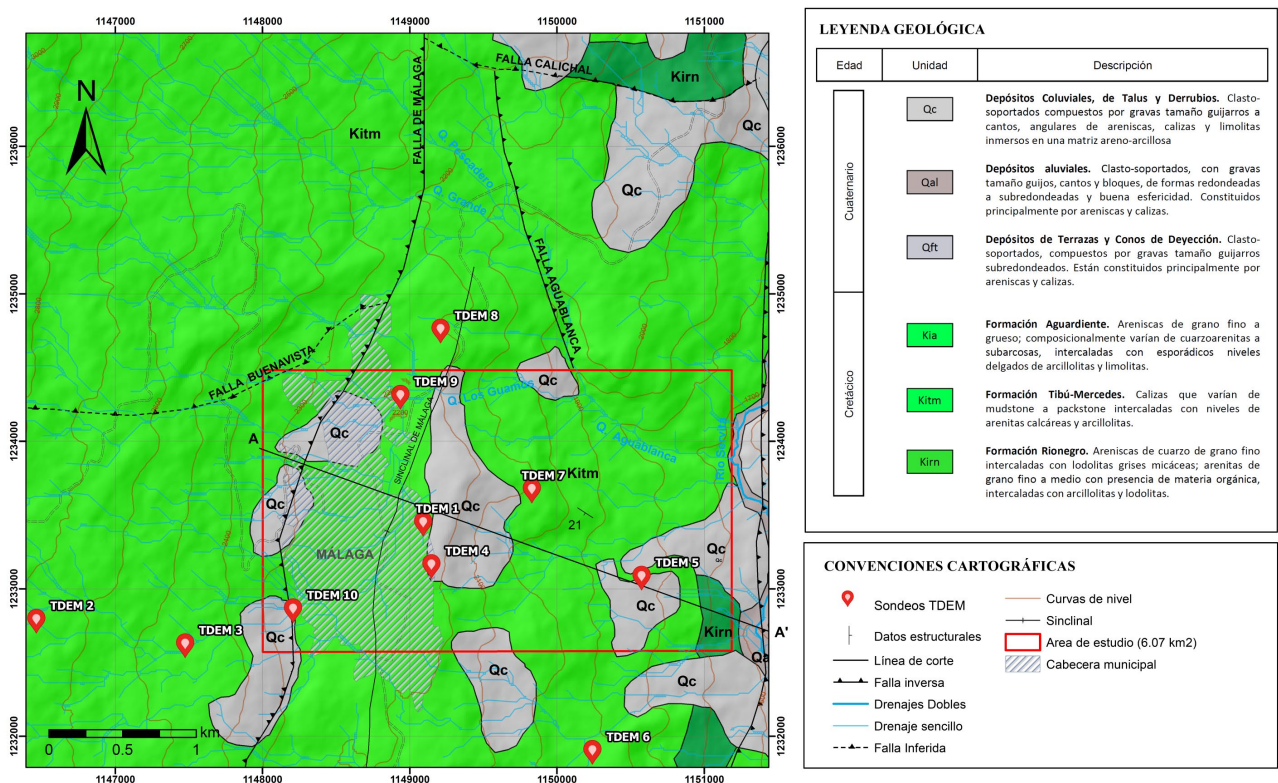
**Figura 25.** Componentes del sistema ABEM WalkTEM.

La configuración o tipo de arreglo que se realizó con el equipo WalkTEM fue antena central de forma cuadrada, donde la antena transmisora se dispone en forma una cuadrada con dimensiones de 40 x 40 m. La consola WalkTEM se coloca en la esquina del inicio y final de la antena. Las dos antenas receptoras se ubican en el centro de la antena TX, donde la RC – 200 forma un cuadrado de 10 x 10m y la RC – 5 se dispone en el punto central, y se conectan a las entradas receptoras del WalkTEM. Una fuente de alimentación externa se conecta al sistema con el cable de batería externo. **(Ver Anexo 25).**

### 5.3.1 Localización e interpretación de datos TDEM

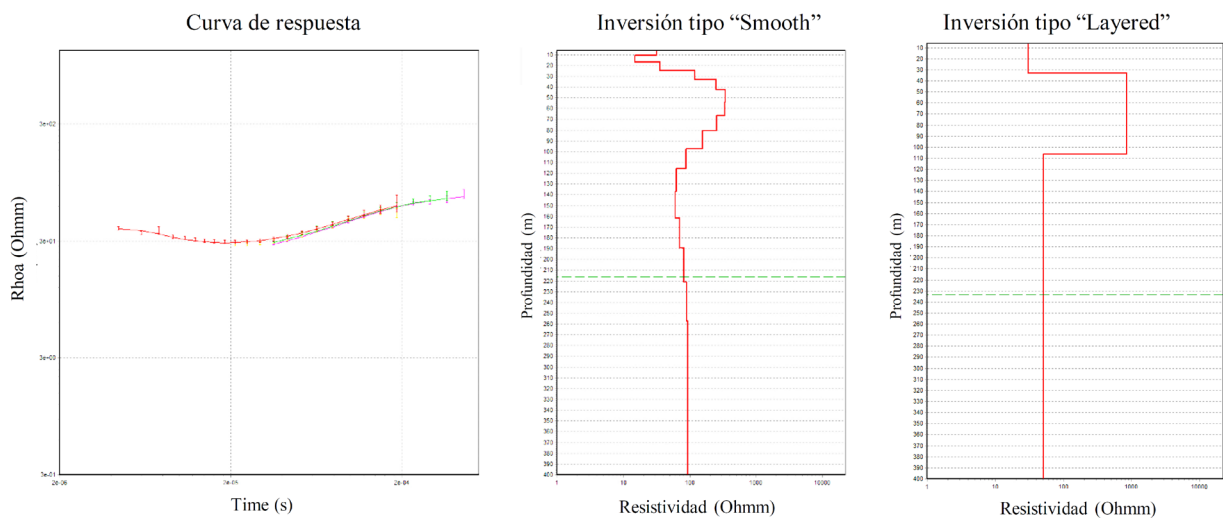
Los sondeos TDEM se realizaron dentro del municipio de Málaga en el casco urbano, en las veredas de Buenavista y el Barzal, y en zonas circundantes. Las ubicaciones se seleccionaron teniendo en cuenta que estos sondeos se deben realizar lo más alejados de cercas eléctricas de baja, media y alta tensión, de transformadores, redes eléctricas, estructuras metálicas, viviendas y demás objetos que puedan interferir con los campos y generar ruido en el momento de la adquisición. En total se realizaron mediciones en 10 puntos (**Ver Anexo 27**), de los cuales los sondeos TDEM-02, TDEM-04, TDEM-05, TDEM-09 y TDEM-10 debido a su localización, las condiciones del terreno y el nivel de ruido presentaron los mejores resultados de penetración y ajuste, los cuales permitieron generar los modelos 1D de la zona de estudio de forma confiable. Para visualizar los resultados de las demás localizaciones **Ver Anexo 16, Anexo 17, Anexo 18, Anexo 19 y Anexo 20**.

**Figura 26.** Localización de los Sondeos TDEM



La información de las mediciones de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TDEM) fue procesada mediante el software SPIA, el cual permite visualizar las curvas de respuesta que se dan en términos de la Resistividad Aparente vs tiempo y de  $dB/dt$  (decaimiento del voltaje) vs tiempo, también permite realizar el filtrado del ruido y la inversión de los datos, ya sea de tipo “Smooth” o “Layered”, y así finalmente generar los modelos de capas 1D de Resistividad vs Profundidad.

**Figura 27.** Proceso de inversión en el software SPIA.

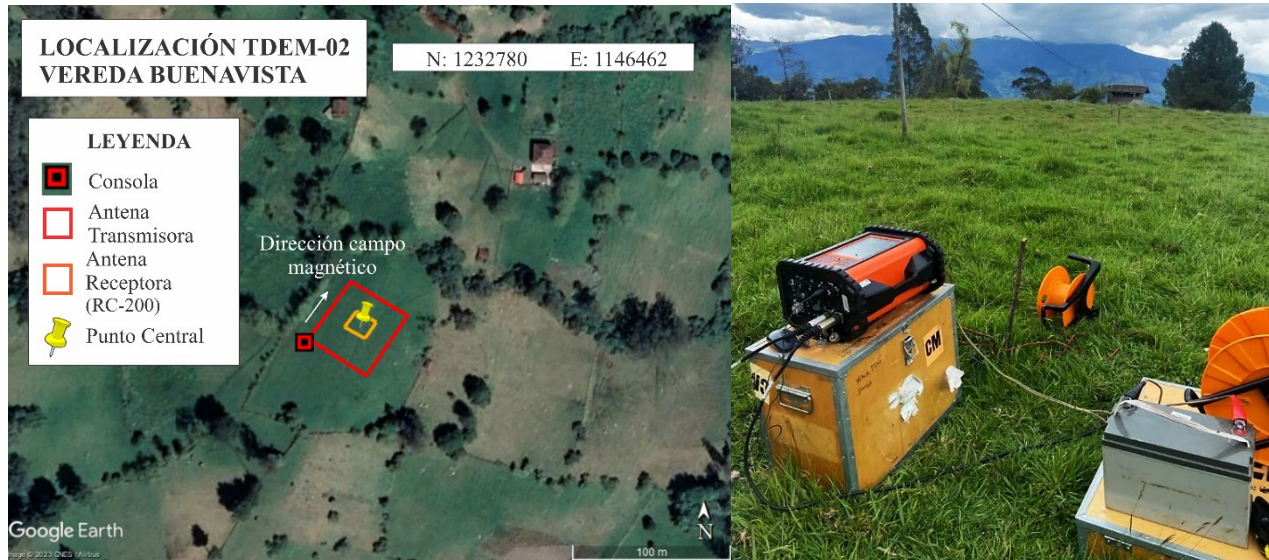


Para la interpretación se obtuvieron las curvas de resistividades aparente vs tiempo con el menor ruido posible; luego se realizó la inversión de los datos obteniendo del modelo de capas, en el que se observa la profundidad y la resistividad en escala logarítmica de cada capa en el subsuelo; luego el corte geológico, que es el resultado de la interpretación geológica que fue realizada con base en los estudios de prospección geofísica previos dentro de la zona (Rincón, 2020; y Suárez, 2021), en los cuales fueron establecidos los rangos de humedad y saturación de las unidades del área, y fueron utilizados como referencia (Ver **Tabla 1**) para cada una de las interpretaciones. y en la parte inferior tablas en las que se resumen las resistividades, espesores y profundidades de cada capa, y algunas

generalidades de cada medición. Para las interpretaciones de los sondeos TDEM restantes (Ver Anexo 21, Anexo 22, Anexo 23 y Anexo 24).

- **TDEM-02:**

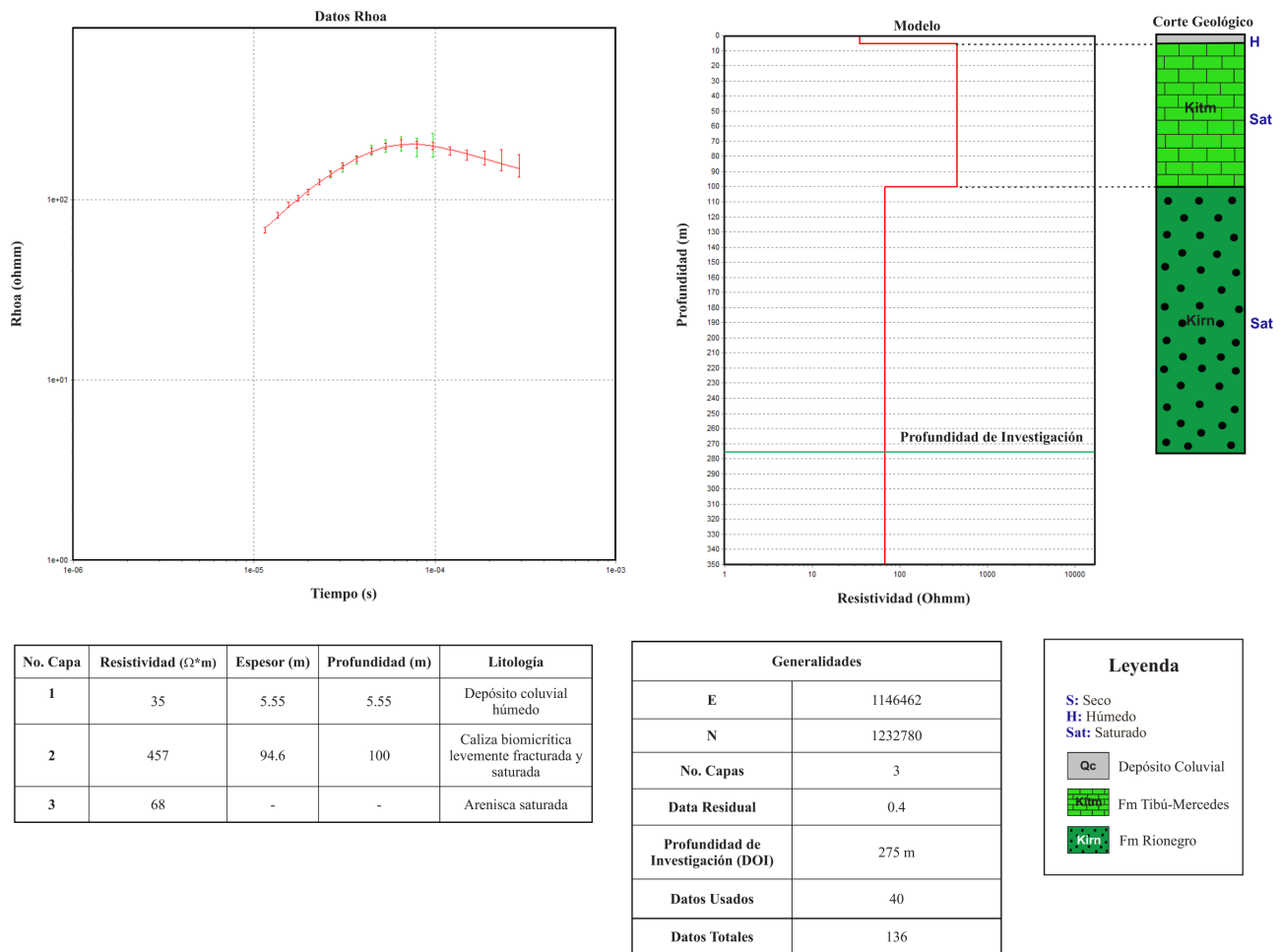
**Figura 28.** Localización TDEM-02.



El TDEM-02 fue realizado en una finca localizada en la Vereda Buenavista, el área se encontraba húmeda por causa de precipitaciones de días previos, presentaba pastos de 15 cm de altura y el terreno tenía un pequeño desnivel en la topografía de menos de 1 m. La zona se encontraba rodeada de cercas metálicas, cuyo paso de corriente fue suspendida durante las mediciones. De la consola a la cerca con dirección NW había 16 m, con la cerca SSW 44 m, de la antena a la cerca al SE 22 m y con la cerca al NE 28 m de distancia.

Esta medición se realizó con el script `Dual_moment_39_gates` y tuvo una duración de 15 minutos, este sondeo alcanzó una *Deep of investigation (DOI)* de 275 m, esta se refiere a la profundidad por debajo de la cual los datos geofísicos superficiales (o aerotransportados) adquiridos son insensibles a las propiedades físicas de la tierra. Es decir, la(s) profundidad(es) a la(s) que las técnicas geofísicas utilizadas en una investigación se vuelven insensibles a las variaciones en el subsuelo (Asch et al., 2015).

**Figura 29.** Procesamiento e Interpretación TDEM-02.

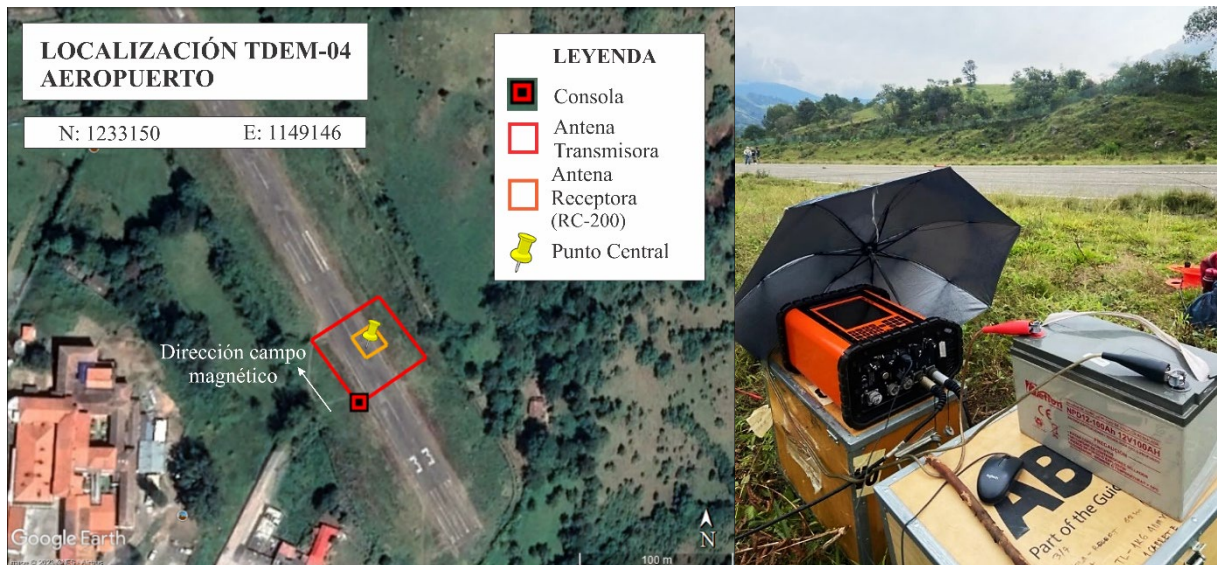


Se generó un perfil (**Figura 29**) compuesto por 3 capas con un data residual (error) de 0.4, el cual se encuentra en un rango bastante aceptable (<5%). Al realizar el corte geológico se interpretó que la capa más superficial está constituida por un depósito coluvial en estado húmedo con un espesor de 5.55 m y una resistividad eléctrica promedio de 35  $\Omega m$ , a esta la infrayace una capa de caliza biomicrítica levemente fracturada y saturada correspondiente posiblemente a la parte inferior de la Fm Tibú-Mercedes, con un espesor de 94.6 m y una resistividad promedio de 457  $\Omega m$ ; por último en la parte inferior se tiene una capa cuyo espesor es desconocido y su resistividad promedio es de 68  $\Omega m$ , esta fue interpretada como una capa de areniscas fracturadas

en estado de saturación de la Fm Rionegro, que se encuentra a una menor profundidad en esta zona ya que se encuentra sobre el flanco occidental del sinclinal de Málaga, que permite que esta unidad aflore hacia el occidente.

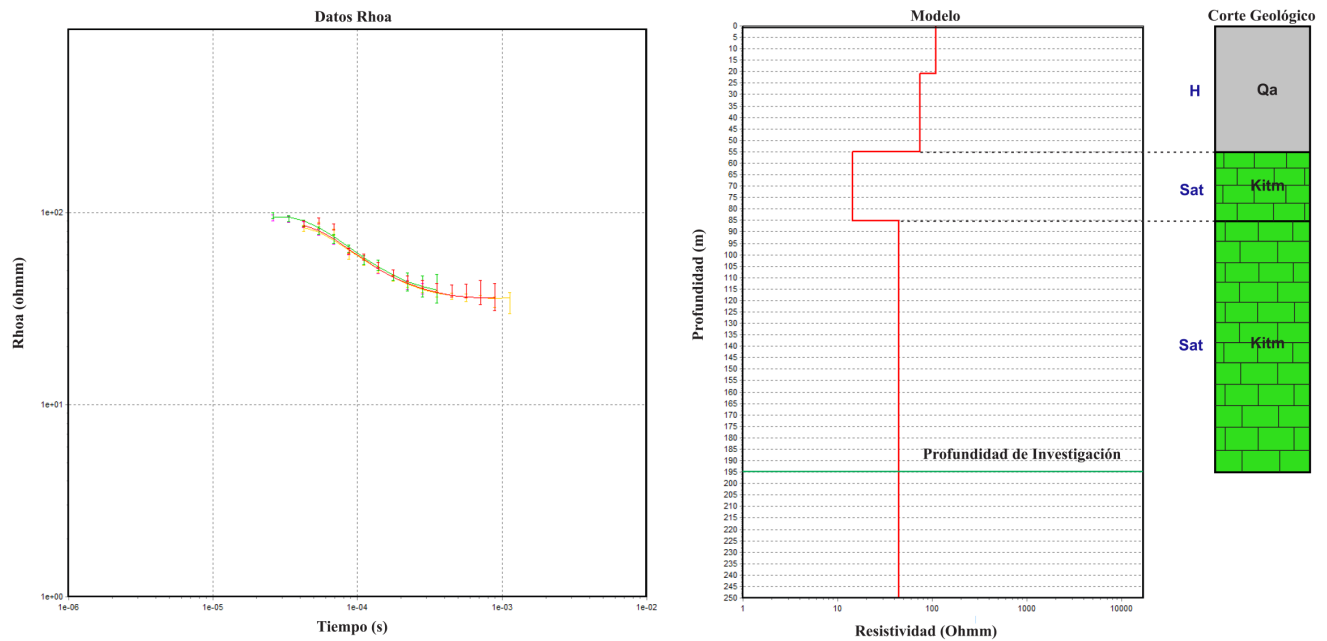
- **TDEM-04:**

**Figura 30.** Localización TDEM-04.



El TDEM-04 fue realizado al SE de la pista del Aeropuerto de Málaga la cual se encuentra cubierta en su mayoría por asfalto, en la zona se pudo observar la presencia de cercas metálicas dispuestas de forma paralela de lado a lado de la pista a 25 m aproximadamente de la antena y algunas viviendas a 40 m de distancia, a las cuales se puede atribuir el ruido durante la medición. Al NW se logró evidenciar la presencia de un sumidero (**Ver Anexo 26**), por lo que se pudo determinar que la pista está situada sobre una zona que ha sufrido intensos procesos de Karstificación asociados a la Fm. Tibú-Mercedes. En el lugar se realizaron 3 mediciones.

**Figura 31.** Procesamiento e Interpretación TDEM-04.



No. Capa	Resistividad ( $\Omega^*m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología
1	92	55.2	55.2	Depósito aluvial húmedo
2	14.4	30.1	85.3	Caliza biomicrítica densamente fracturada y saturada
3	44.5	-	-	Caliza biomicrítica fracturada y saturada

Generalidades	
E	1149146
N	1233150
No. Capas	3
Data Residual	1.3
Profundidad de Investigación (DOI)	195 m
Datos Usados	59
Datos Totales	106

Leyenda	
S: Seco	
H: Húmedo	
Sat: Saturado	
Qa	Depósito Aluvial
Kitm	Fm Tibú-Mercedes
Kirn	Fm Rioneiro

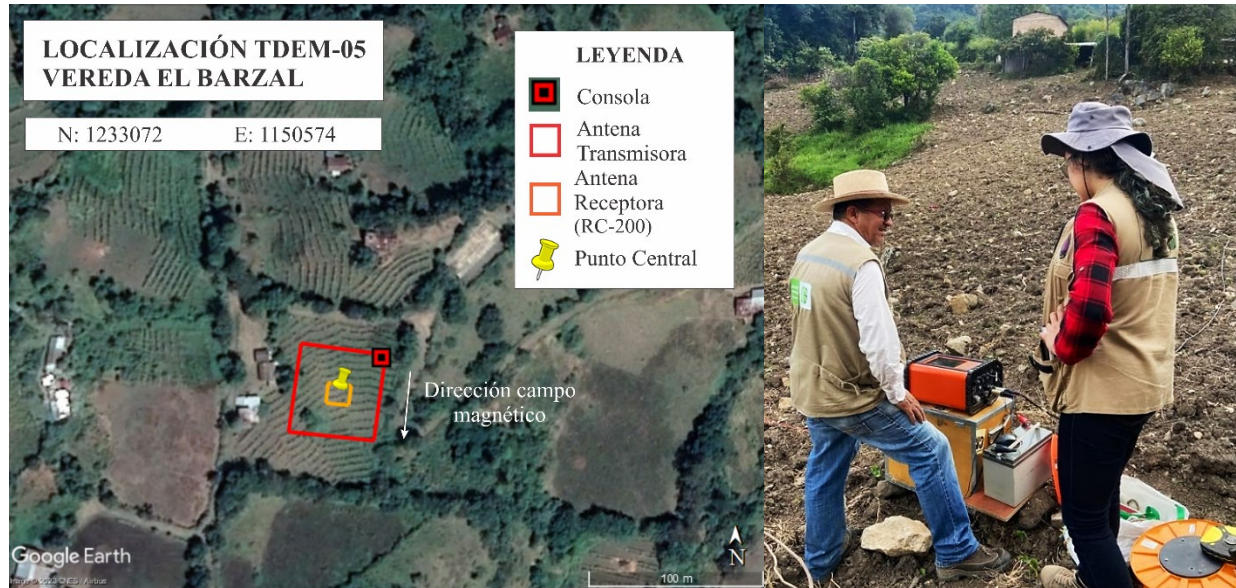
Esta medición se realizó con el script Dual\_moment\_tetscript y tuvo una duración de 5 minutos, este sondeo alcanzó una DOI de 195 m.

Con la inversión de los datos se generó un perfil (**Figura 31**) compuesto por 3 capas con un data residual (error) de 1.3. Al realizar el corte geológico se interpretó que la capa superficial está constituida por un depósito aluvial en estado húmedo con un espesor de 55.2 m y una resistividad eléctrica promedio de 92  $\Omega m$ , a esta la infrayace una capa de caliza biomicrítica con mayor densidad de fracturación y un estado mayor de saturación con un espesor de 30.1 m y una resistividad promedio de 14.4  $\Omega m$ , por último, en la parte inferior se tiene una capa de caliza

biomicrotica con menos densidad de fracturación y saturación, cuyo espesor es desconocido y su resistividad promedio es de  $44.5 \Omega\text{m}$ . Las calizas pertenecen a la Fm Tibú-Mercedes.

- **TDEM-05:**

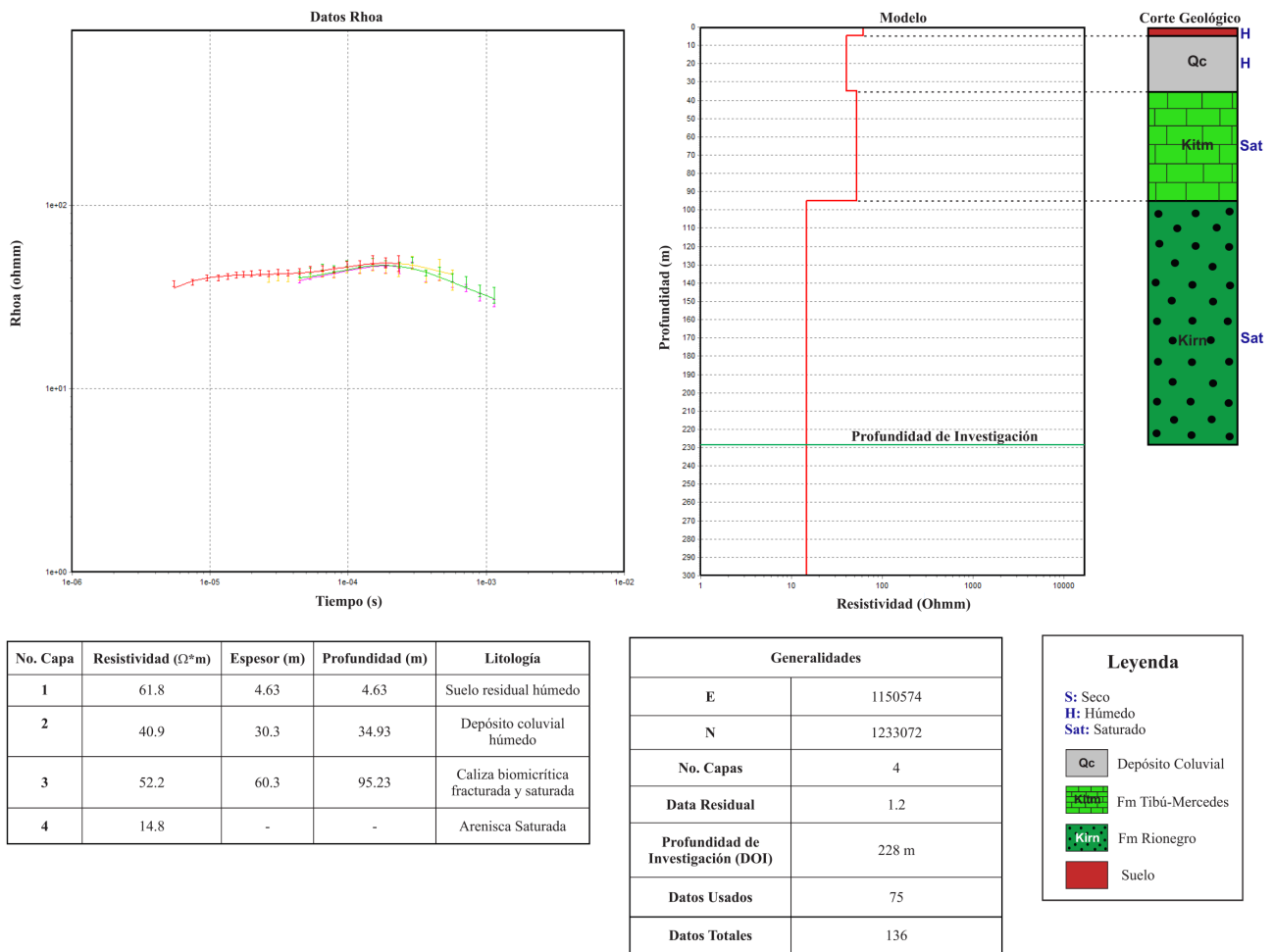
**Figura 32.** Localización TDEM-05.



El TDEM-05 fue realizado en la Vereda El Barzal, entre el caso urbano de Málaga y el Río Servitá, donde el terreno se encontraba ligeramente inclinado y totalmente descubierto, lo que facilitó la disposición del arreglo. Al NW y NE de la antena se identificaron dos postes de luz a 22 m de distancia, que fueron las posibles fuentes de ruido dentro de la zona.

Esta medición se realizó con el script `Dual_moment_39_gates` y tuvo una duración de 40 minutos, este sondeo alcanzó una DOI de 228 m.

**Figura 33.** Procesamiento e Interpretación TDEM-05.



Se genero un perfil (**Figura 33**) compuesto por 4 capas con un data residual (error) de 1.2. Al realizar el corte geológico se interpretó que la capa superficial está constituida por un suelo arcilloso residual en estado húmedo con un espesor de 4.63 m y una resistividad eléctrica promedio de 61.8  $\Omega m$ , a esta la infrayace una capa que corresponde a un depósito coluvial húmedo con un espesor de 30.3 m y una resistividad promedio de 40.9  $\Omega m$ , seguida hay una capa de calizas biomicríticas fracturadas y saturadas de la Fm Tibú-Mercedes con un espesor de 60.3 m y una resistividad promedio de 52.2  $\Omega m$ , por último, en la parte inferior se tiene una capa que fue

interpretada como areniscas fracturadas saturadas de la Fm Rionegro cuyo espesor es desconocido y su resistividad promedio es de  $14.8 \Omega\text{m}$ .

- **TDEM-09:**

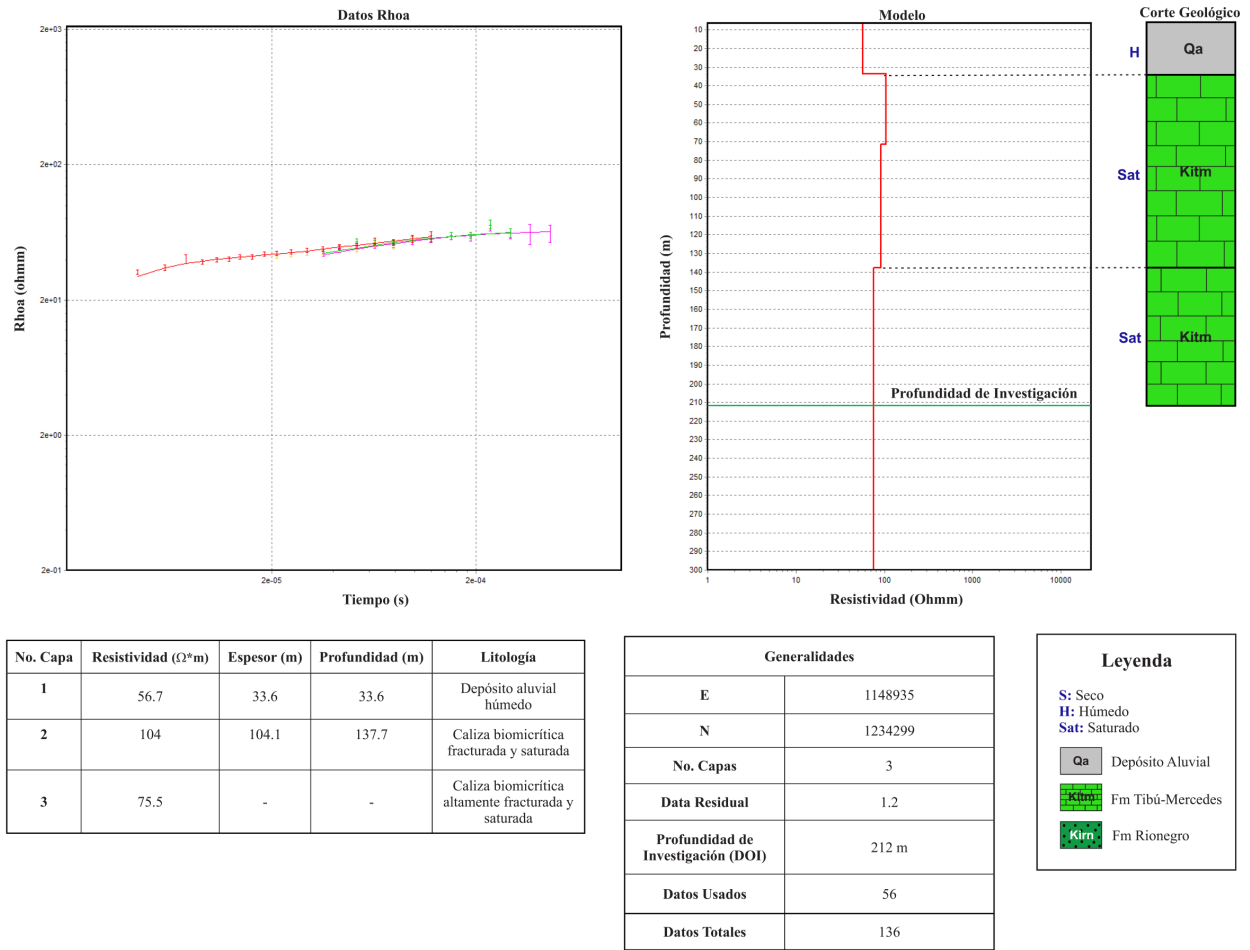
**Figura 34.** Localización TDEM-09.



El TDEM-09 se realizó al norte del casco urbano del municipio, específicamente en la Finca Tajamara, donde el pasto del terreno tenía 10-15 cm de alto. El lugar se encontraba rodeado por 3 cercas metálicas y una cerca eléctrica, la cerca al SEE estaba a 55 m de la consola, la del N a 10 m, la cerca al S a 9 m de la antena transmisora y la cerca al SWW a 50 m. En el lugar se realizaron 3 mediciones.

Esta medición se realizó con el script `Dual_moment_39_gates` y tuvo una duración de 40 minutos, este sondeo alcanzó una DOI de 212 m.

**Figura 35.** Procesamiento e Interpretación TDEM-09.



Se generó un perfil (**Figura 35**) compuesto por 3 capas con un data residual (error) de 1.2. Al realizar el corte geológico se interpretó que la capa más superficial está constituida por un depósito aluvial en estado húmedo con un espesor de 33.6 m y una resistividad eléctrica promedio de 56.7  $\Omega m$ , a esta unidad la infrayace una capa de calizas biomicríticas fracturadas y saturadas con un espesor de 104.1 m y una resistividad promedio de 104  $\Omega m$ , por último, en la parte inferior se tiene una capa de caliza biomicrítica con mayor densidad de fracturación y saturada cuyo espesor es desconocido y su resistividad promedio es de 75.5  $\Omega m$ . Las dos últimas capas corresponden a la Fm Tibú-Mercedes.

- **TDEM-10:**

**Figura 36.** Localización TDEM-10.

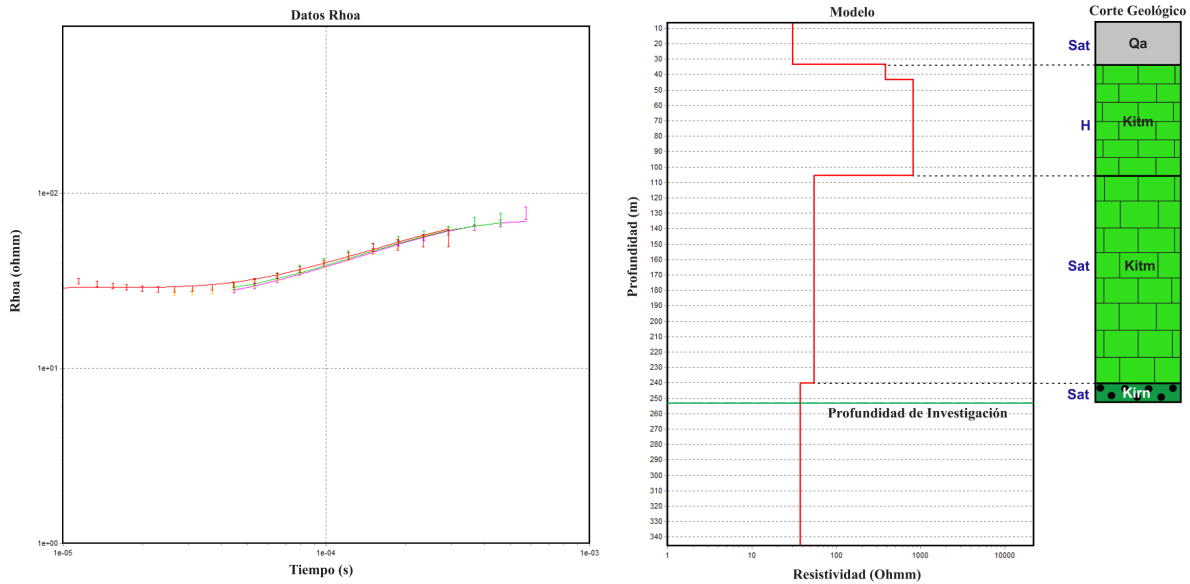


El TDEM-10 fue realizado en un lote ubicado detrás del Estadio “Ramón Rojas Herrera”, el cual se encontraba cubierto por un pasto de baja altura. Las cercas metálicas estaban situadas a 40 m de la antena transmisora al E y 30 m al S, se logró identificar una quebrada hacia el sur a 15 m del arreglo, y las casas estaban situadas a 35 m de este aproximadamente. En el lugar se realizaron 3 mediciones. Esta medición se realizó con el script `Dual_moment_39_gates` y tuvo una duración de 10 minutos, este sondeo alcanzó una DOI de 253 m.

Se generó un perfil (**Figura 37**) compuesto por 4 capas con un data residual (error) de 1.95. Al realizar el corte geológico se interpretó que la capa superficial está constituida por un depósito aluvial en estado saturado con un espesor de 33.4 m y una resistividad eléctrica promedio de 30.8  $\Omega\text{m}$ , a esta la infrayace una capa de calizas compactas y con un grado de humedad bajo con un espesor de 72.4 m y una resistividad promedio de 817  $\Omega\text{m}$ , el siguiente nivel se interpretó como una capa de calizas biomicriticas fracturadas y saturadas de la Fm Tibú-Mercedes con un espesor de 134 m y una resistividad promedio de 54.6  $\Omega\text{m}$ , por último, en la parte inferior se tiene una capa de menor resistividad que por su profundidad fue interpretada como un nivel areniscas

saturadas y fracturadas de la Fm Rionegro cuyo espesor es desconocido y su resistividad promedio es de 37.9 Ωm.

**Figura 37.** Procesamiento e Interpretación TDEM-10.



No. Capa	Resistividad (Ω²m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología
1	30.8	33.4	33.4	Depósito aluvial saturado
2	817	72.4	105.8	Caliza biomicrítica compacta y bajo grado de humedad
3	54.6	134	239.8	Caliza biomicrítica fracturada y saturada
4	37.9	-	-	Arenisca fracturada y saturada

Generalidades	
E	1148206
N	1232851
No. Capas	4
Data Residual	1.95
Profundidad de Investigación (DOI)	253 m
Datos Usados	68
Datos Totales	136

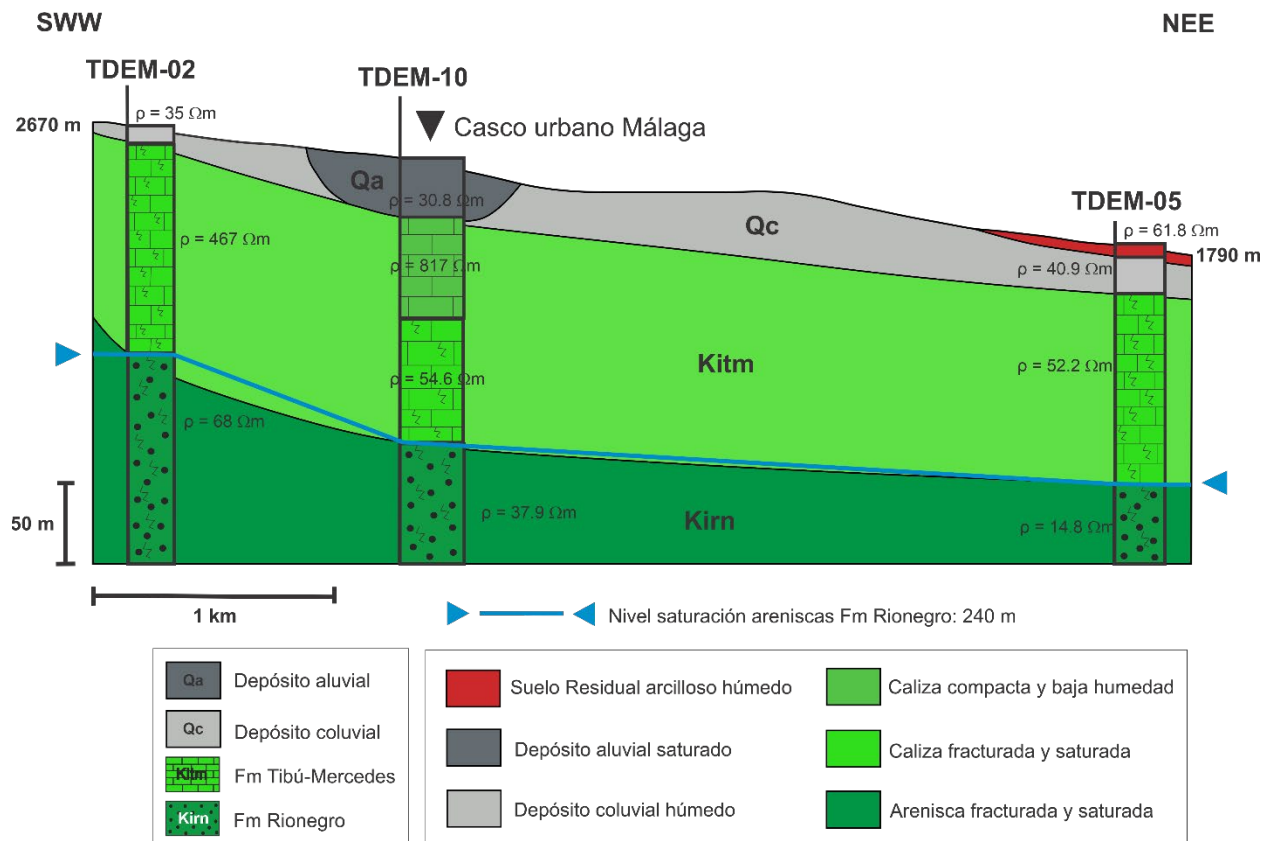
Leyenda	
S: Seco	
H: Húmedo	
Sat: Saturado	
Qa	Depósito Aluvial
Kitm	Fm Tibú-Mercedes
Kirn	Fm Rionegro

De acuerdo con los resultados especialmente los de TDEM 02, TDEM 05 y TDEM 10, ya que en estos sondeos se logró alcanzar los niveles superiores de la Formación Rionegro se construyó el modelo geoelectrico unificado con la información geológica (**Figura 38**). Con el modelo se pudo determinar que los miembros superiores de la Formación Rionegro presentan registros de resistividades muy bajos (<70Ωm), los cuales se traducen en la posible presencia de agua asociada a su porosidad secundaria, la cual se debe al intenso fracturamiento de esta unidad que es causa del control estructural de la zona. Por consiguiente, se puede definir que la Formación

Rionegro presenta vocación acuífera con potencial de almacenamiento de agua y según sus características litológicas podría clasificarse como un acuífero de tipo detrítico y fracturado (*Hispagua, 2023*). Así mismo, se puede interpretar que debido a procesos de disolución y karstificación dentro de la Formación Tibú-Mercedes, el agua se encuentra percolando y almacenándose en las areniscas fracturadas de Formación Rionegro.

Por otro lado, también se determinó el estado de saturación de la formación Tibú-Mercedes, que ya había sido caracterizada y clasificada en estudios previos como un acuífero Kárstico con potencial de alta capacidad de producción (*Suárez, 2021*), y en este caso fue posible la determinación de su espesor total a la altura del casco urbano en el TDEM 10 con valores de ~207 m.

**Figura 38.** Modelo geoelectrico final unificado con la información geológica de la zona.



#### **5.4 Zonas potenciales para el emplazamiento de pozos de explotación de aguas subterráneas**

La construcción de pozos de explotación de agua corresponde a una de las técnicas más comunes para acceder al agua subterránea que se encuentra contenida en acuíferos. En esta sección se realiza la definición de la zona con mayor potencial para el emplazamiento de un pozo de explotación acuífera dentro del área de estudio con el fin de brindar información base para futuros trabajos que busquen alternativas para el suministro de este recurso en el Municipio de Málaga, Santander.

Para definir las locaciones de emplazamiento de estos pozos se deben tener en cuenta algunos aspectos generales muy importantes:

- Se debe conocer la profundidad del acuífero o la zona saturada.
- El lugar debe estar alejado de puntos de contaminación de las aguas subterráneas como letrinas, fosas sépticas, corrales, establos, redes de alcantarillado, entre otras.
- Fácil acceso al terreno para la maquinaria de perforación.
- Presencia redes eléctricas con capacidad suficiente cercanas.
- Permisos y servidumbres de acceso al sitio de perforación.
- Una distancia mínima a la red de acueducto si el pozo se perfora como soporte del abastecimiento de agua municipal o de alguna comunidad.

Para este caso, con base en los resultados de la sección anterior, se logró evidenciar que la zona con mayor potencial para el emplazamiento de un pozo de explotación de aguas subterráneas corresponde al área localizada detrás del Estadio “Ramón Rojas Herrera”, donde se registraron los valores más bajos de resistividad de la Formación Rionegro que se traducen en un estado de saturación mayor y se plantea la localización de la zona saturada a una profundidad de ~250 m. Además, es una zona de fácil acceso, cuenta con redes de electricidad cercanas y se encuentra a

300 m de la planta de acueducto de Málaga, con una diferencia de nivel de menos de 100 m. Asimismo, se encuentra lejos de zonas o puntos de contaminación. En la **Figura 39** se puede observar que este fue ubicado sobre un terreno muy próximo al lugar donde se realizó el sondeo, que es propiedad del Municipio de Málaga. Para todo lo relacionado con permisos y trámites legales, se deben realizar conforme a lo dispuesto en la Resolución 1058 de 2021 (CAS, 2022).

**Figura 39.** Localización con mayor potencial para el emplazamiento del pozo de explotación de aguas subterráneas.



El área localizada detrás del Estadio cuenta con un alto potencial para el emplazamiento de un pozo de aguas subterráneas y podría convertirse en una buena alternativa en caso del desarrollo de un proyecto en busca de nuevas fuentes de abastecimiento de agua del municipio en épocas de racionamiento. Sin embargo, según el *Ministerio de Ambiente, Vivienda, y Desarrollo Territorial (2003)*, se ha definido que para la perforación de pozos profundos es necesario realizar más estudios previos, como ensayos de bombeo para la definición de parámetros hidráulicos como la conductividad hidráulica del acuífero, el coeficiente de almacenamiento, la transmisividad, entre otros; que permitan definir todos los requerimientos técnicos y económicos, para establecer con plena seguridad el lugar de emplazamiento de un pozo de explotación de Aguas subterráneas.

## 6. Conclusiones

Las características geológicas, geomorfológicas y estructurales observadas y descritas de la zona de trabajo, permiten identificar una alta probabilidad de almacenamiento de agua en el área debido al grado y densidad de fracturamiento y al proceso de karstificación de la Formación Tibú-Mercedes que permite que el agua de lluvia principalmente percole y se almacene en la unidad que la suprayace, que corresponde a la Formación Rionegro que presenta litologías porosas y con un grado alto de fracturamiento que aumenta su permeabilidad, permitiendo la captación del recurso hídrico. **(Ver Sección 5.1 pág. 32).**

Las simulaciones realizadas a partir del uso de códigos de las librerías de PyGIMLi y SimPEG de acuerdo a los distintos escenarios posibles planteados en los modelos sintéticos de la distribución geológica a profundidad del área de estudio, para los métodos geofísicos seleccionados, en los que se analizó datos de resistividad, conductividad, espesor, frecuencia y decaimiento magnético, y en las que se tuvo en cuenta, parámetros de configuración, equipos a disposición, características generales y curvas de respuesta, indica que la aplicación del Método Electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM), es el método geofísico más idóneo para caracterizar la geología de la zona de estudio a la profundidad de la formación Rionegro de acuerdo a su buena resolución, facilidad en la lectura y su alto alcance de profundidad. **(Ver Sección 5.2 pág. 44).**

Con los sondeos TDEM, realizados dentro del casco urbano del municipio de Málaga y zonas circundantes, se lograron obtener los modelos 1D de Resistividad vs Profundidad de capas generados en el software SPIA para cada caso, y mediante su interpretación geológica fue posible la construcción de cortes geológicos a profundidad donde se caracterizaron los miembros superiores de la Formación Rionegro, y se observó que presentan valores muy bajos de resistividad

(<70Ωm), lo que traduce la posible presencia de agua asociada a su porosidad secundaria y esto gracias a un alto nivel de fracturamiento, con lo que se puede definir que los niveles superiores de la Formación Rionegro si cuentan con vocación acuífera, y se puede clasificar según su litología como un acuífero de tipo detrítico fracturado. **(Ver Sección 5.3 pág. 66).**

Con base en los modelos geológicos 1D de la zona de estudio, fue posible sugerir que la zona con mayor potencial para el emplazamiento de un pozo de explotación de aguas subterráneas corresponde al área ubicada detrás del estadio “Ramón Rojas Herrera”, ya que cuenta con un fácil acceso, redes eléctricas cercanas, no se encuentra cerca a fuentes posibles de contaminación y se encuentra a una distancia aproximada de 300 m de la planta de acueducto de Málaga, con una diferencia de nivel de menos de 100 m. Sin embargo, aun faltarían algunos estudios para la definición de parámetros hidráulicos, que permitan definir la construcción del pozo dentro del área con completa seguridad. **(Ver Sección 5.4 pág. 81)**

En definitiva, con el desarrollo de esta investigación fue posible la caracterización de los miembros superiores de la formación Rionegro con la implementación de una nueva metodología geofísica que corresponde a los sondeos TDEM, donde se definió el estado de saturación de estos niveles con base en los bajos valores de resistividad registrados, y también fue posible la determinación del espesor total de la formación Tibú-Mercedes en algunas zonas. Por consiguiente, esta investigación corresponde a un nuevo aporte al conocimiento hidrogeológico de la zona y una contribución al futuro planteamiento de nuevas alternativas para el suministro de agua en épocas de desabastecimiento para los habitantes del Municipio de Málaga, Santander.

## **7. Recomendaciones**

Se recomienda la construcción de un pozo exploratorio o de prueba, que permita validar los modelos hidrogeológicos y geofísicos previamente planteados del área de estudio, y a su vez, que pueda brindar un conocimiento más detallado sobre las litologías preexistentes y sus propiedades, tales como la porosidad y la permeabilidad.

Se hace necesario el desarrollo de ensayos de bombeo para la determinación de las propiedades hidráulicas (conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento), que permitan caracterizar en detalle el sistema acuífero asociado a los niveles superiores de la Formación Rionegro y definir su capacidad de producción; para finalmente evaluar la viabilidad de la construcción de un pozo para el aprovechamiento de las aguas subterráneas a esta profundidad.

**Referencias Bibliográficas**

- Aizebeokhai, A. P., & Oyeyemi, K. D. (2018). Caractérisation géo-électrique d'aquifères de socle: le cas d'Iberekodo, Sud-ouest du Nigéria. *Hydrogeology Journal*, 26(2), 651–664.  
<https://doi.org/10.1007/s10040-017-1679-9>
- Al Farajat, Mohammmd et al. (2015). Using GIS And Geophysics In Selecting Suitable Basins With Freshwater Aquifers For An Efficient Exploration Strategy - A Case Study From Petra-Region, Jordan. *Earth Sciences Research Journal* (2015),19(1): 39.
- Asch, T., Abraham, J. D., & Irons, T. (2015, August 19). A Discussion on Depth of Investigation in Geophysics and AEM Inversion Results. ResearchGate; unknown.  
[https://www.researchgate.net/publication/299905910\\_A\\_Discussion\\_on\\_Depth\\_of\\_Investigation\\_in\\_Geophysics\\_and\\_AEM\\_Inversion\\_Results#:~:text=The%20Depth%20of%20Investigation%20\(DOI,to%20variations%20in%20the%20subsurface.](https://www.researchgate.net/publication/299905910_A_Discussion_on_Depth_of_Investigation_in_Geophysics_and_AEM_Inversion_Results#:~:text=The%20Depth%20of%20Investigation%20(DOI,to%20variations%20in%20the%20subsurface.)
- Bernard, J., Leite, O. (2015). Utilización de métodos de resistividad en los estudios hidrogeológicos.  
[https://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libros2\\_TH/actu\\_tec\\_geofi/pdf/12a\\_comunicacion.pdf](https://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libros2_TH/actu_tec_geofi/pdf/12a_comunicacion.pdf)
- Bhattacharya PK, Patra H.P. (1968). Direct current geoelectrical sounding. Elsevier, Amsterdam, 135 pp.
- CAI. (Marzo, 2015). Publicación Revista CAI número 1114. Pág. 18. Premios que impulsan la ingeniería. El agua, un recurso limitado y estratégico.
- Calixto L. (2017). Métodos geofísicos para la búsqueda de aguas subterráneas y prediseño de un pozo de extracción para la empresa transavella, en la ciudad de Sogamoso, Boyacá. tesis de grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

- Caracol Radio. (2022). Bucaramanga. Málaga inició racionamiento de agua. [https://caracol.com.co/emisora/2022/01/20/bucaramanga/1642676555\\_790174.html](https://caracol.com.co/emisora/2022/01/20/bucaramanga/1642676555_790174.html)
- Chuma C, Orimoogunje OIO, Hlatywayo DJ, Akinyede OJ (2013). Application of remote sensing and geographical information systems in determining the groundwater potential in the crystalline basement of Bulawayo metropolitan area, Zimbabwe. *Sci Res Adv Remote Sens* J 2(2):149–116
- Colombiano, S. G. (2014). Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1: 100.000 Plancha 136-Málaga. Santander, Colombia.
- Corporación Autónoma Regional de Santander. (2022). Concesión de aguas subterráneas. <https://www.funcionpublica.gov.co/VisorSUIT/index.jsf?FI=37010>.
- Davis, S. N. & De Wiest, R. (1966). *Hydrogeology*. Nueva York: John Wiley and Sons.
- EG Sciences. (2021). Vertical electrical Sounding, Egsciences.com. <https://egsciences.com/service/vertical-electrical-sounding/>
- Empresas Públicas Municipales de Málaga. (2022). Málaga afrontará un nuevo racionamiento de agua potable. [Espmalaga.gov.co. http://www.espmalaga.gov.co/noticias/malaga-afrontara-un-nuevo-rationamiento-de-agua-potable](http://www.espmalaga.gov.co/noticias/malaga-afrontara-un-nuevo-rationamiento-de-agua-potable)
- Everest Geophysics. (2020). Sondeo Eléctrico Vertical. <https://everestgeophysics.com/es/metodos/electricos/sondeo-electrico-vertical/>
- GEODATOS. Geofísica de Avanzada. (2022). Método Magnetotelúrico <http://www.geodatos.cl/mt.php>
- Geotem. (2016). Sondeo Eléctrico Vertical. <http://www.geotem.com.mx/electrico1.php>

- Giménez, M., Menta, A., Ramos, J., Musso, M., & Flaquer, A. (2021). Aplicación de métodos geofísicos al estudio del sistema hidrogeológico Libertad Raigón de Uruguay. *Boletín geológico y minero*, 132(1), 185-196.
- González, C. (2021). Caracol Radio. 50 municipios de Santander tienen problemas de agua, incluidos los del Área. [https://caracol.com.co/emisora/2021/03/18/bucaramanga/1616090296\\_741832.html](https://caracol.com.co/emisora/2021/03/18/bucaramanga/1616090296_741832.html)
- Guideline Geo. (2021). Transient Electromagnetics TEM. <https://www.guidelinegeo.com/transient%20electromagnetics-tem/>
- Hispagua. (2023). Hidrogeología. Cedex.es. <https://hispagua.cedex.es/datos/hidrogeologia>
- HydroGeophysics Group. (n.d.). AARHUS UNIVERSITY. Getting started with ViewTEM.
- Ingeominas. (1981). Geología de las planchas 136 Málaga Y 152 Soatá cuadrángulo I-13 escala 1:100.000 Memoria Explicativa. Bogotá. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024239/documento/pdf/0101242391101000.pdf>
- Julivert et al. (1968). Lexique Stratigraphique International, Amerique Latine: Centre Nat. Res. Scient. (París) 5, Fasc. 4a, Colombie (Premiere partie) 651 p.
- Koefoed O (1989). Geosounding principles, 1: resistivity sounding measurements. Elsevier, Amsterdam, 275 pp.
- La Moreaux P. y Powell W Estratigraphic and Structural guide to the development of water Wells and well field in a Limestone Terrane. *Inter Assoc Scien, Hidrology*. Publicación 52 1960 pag. 563-575.
- López-Loera, H.M. (2014). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 66*.
- Magnetotelúrica. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. (2022). Icgcat. <https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Geofisica->

[aplicada/Tecnicas/Magnetotelurica#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20magnetotel%C3%BArico%20\(MT\)%20es,la%20frecuencia%20\(periodo\)%2C%20es](#)

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2003). Organización Panamericana de la Salud. Perforación Manual de Pozos Profundos de Pequeño Diámetro. [https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/guia-ras\\_007.pdf](https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/guia-ras_007.pdf)

Muchingami, I., Chuma, C., Gumbo, M., Hlatywayo, D., & Mashingaidze, R. (2019). Approaches to groundwater exploration and resource evaluation in the crystalline basement aquifers of Zimbabwe. *Hydrogeology Journal*, 27(3), 915-928.

Mussett, A. E., & Khan, M. A. (2000). *Looking into the earth: an introduction to geological geophysics*. Cambridge University Press.

Naturaliza – Ecoembes. Sancho, A. (2019, April 26). El agua potable, un recurso limitado. <https://www.naturalizaeducacion.org/2019/04/26/agua-potable/>

Notestein, F., Hubman, C.W. & Bowler, J.W. (1944). Boulder, Colorado. Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 55:1165-1216

Otálvaro, M. V. V., Pimienta, C. O., & Quintero, M. C. V. (2011). *Las aguas subterráneas. Un enfoque práctico*. Libros del Servicio Geológico Colombiano. <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/view/76/72/558-1>

Porres Benito, J. Á. (2003). *Caracterización de Cavidades en el Subsuelo Mediante la Interpretación de Perfiles de Tomografía Eléctrica, Aplicación al Yacimiento Arqueológico de Clunia*. Universidad de Burgos. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=1417>

Pissa Lizarazo, S. A. (2015). *Guía básica de construcción de pozos profundos en Colombia*. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17141/GUIA%20BASICA%20DE%20CONSTRUCCION.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- PyGIMLi. (2021). Geophysical Inversion and Modelling Library. VES inversion for a blocky model. Uni-Bonn.de. [http://www2.geo.uni-bonn.de/~wagner/pg/\\_tutorials\\_auto/3\\_inversion/plot\\_2-dc1dblock.html#sphx-glr-tutorials-auto-3-inversion-plot-2-dc1dblock-py](http://www2.geo.uni-bonn.de/~wagner/pg/_tutorials_auto/3_inversion/plot_2-dc1dblock.html#sphx-glr-tutorials-auto-3-inversion-plot-2-dc1dblock-py)
- Reynolds, J. M. (2011). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. New York, NY: Wiley-Blackwell.
- Richards, H.G. (1968). Oklahoma. Cretaceous section in Barco area of northeastern Colombia: Am. Assoc. Petr. Geolo. Bull. 38 (2): 193-283.
- Rincón, J.L. (2019). Prospección geoelectrica para el modelado 2D de la resistividad del subsuelo en el área perimetral del casco urbano del Municipio de Málaga (Santander). Universidad Industrial de Santander.
- SGC. (2014). Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 136-málaga, departamentos de Santander y Boyacá. Servicio Geológico Colombiano (SGC) Dirección de Geoamenazas Dirección Geociencias Básicas.
- Suárez, N. (2021). Manizales. Construcción de modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero bajo el casco urbano del municipio de Málaga, Santander. Tesis de posgrado. Universidad Nacional de Colombia.
- Time-Domain Electromagnetic Surveys | EM | Geophysical Surveys. (2021). Olson Engineering. <https://olsonengineering.com/methods/geophysical-methods/electromagnetics/time-domain-em/>
- TRESGEO. (2015). Geofísica: Magnetotelúrica y Magnetometría. <https://www.tresgeo.com/geofisica-america-electromagnetica>

- US. (2022). Time-Domain Electromagnetic Methods. Epa.gov.  
[https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/time-domain\\_electromagnetic\\_methods.html](https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/time-domain_electromagnetic_methods.html)
- Vargas, R., Arias, A., Jaramillo, L., & Téllez, N. (1981). Memoria explicativa: Geología de las planchas 136 Málaga y 152 Soatá, Cuadrángulo I–13. Boletín Geológico, 24(3), 76.
- Velandia, F., García-Delgado, H., Zuluaga, C.A., López, J.A., Bermúdez, M.A., Audemard, F.A. (2020). Present-day structural frame of the Santander Massif and Pamplona Wedge: The interaction of the Northern Andes. Journal of Structural Geology, 137(January).  
<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104087>
- Weather Spark. (2022). El clima y el tiempo promedio en todo el año en Málaga.  
<https://es.weatherspark.com/y/25290/Clima-promedio-en-M%C3%A1laga-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Zohdy AAR (1969) Application of deep electrical soundings for ground-water exploration in Hawaii. Geophysics 34:584–600.

## Anexos

**Anexo 1.** Resumen de los diferentes métodos eléctricos y electromagnéticos a usar en el proyecto con sus principales características.

<b>Método</b>	<b>Parámetro que controla la profundidad</b>	<b>Tipo de Medición</b>	<b>Variación en profundidad</b>	<b>Equipo en la escuela de geología</b>
Sondeo eléctrico vertical (SEV)	Longitud del arreglo electródico	Cambios de voltaje para una determinada corriente	Si, pero asume horizontalidad en capas	TERRAMETER
Método electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM)	Tamaño del bucle del transmisor	Tiempo de caída de la señal de campo inducida	Si, pero asume horizontalidad en capas	ABEM WalkTEM
Magnetotelúrica (MT)	Rango de frecuencias naturales y tiempo total de medición	Fluctuaciones temporales de los campos electromagnéticos naturales	Si, pero asume horizontalidad en capas	GEOMETRICS

**Anexo 2.** Clasificación de los métodos geofísicos.

MÉTODOS	FUENTE O PARÁMETROS	CAMPO UTILIZADO	PROPIEDAD FÍSICA	CAMPO DE EXPLORACIÓN
Eléctrico	Corrientes Telúricas	Natural	Resistividad	Hidrogeología, yacimientos minerales, ingeniería, arqueología
	Potencial propio	Natural		
	Líneas equipotenciales	Inducido		
	Resistivo	Inducido		
Sísmico	Caída de potencial	Inducido	Módulo elástico, densidad	Hidrocarburos, geología regional, ingeniería
	Terremotos	Natural		
	Refracción	Inducido		
Gravimétrico	Reflexión	Inducido	Densidad	Hidrocarburos, geología regional
	Gravedad	Natural		
Magnético	Campo magnético	Natural	Susceptibilidad	Hidrocarburos, geología regional, yacimientos minerales, localización, arqueología
Radiactivo	Radiactividad	Natural o Inducido	Radiación gamma	Geología, yacimientos minerales, hidrocarburos, ambiental
Térmico	Temperatura	Natural o Inducido	Calor	Geología, ingeniería

Nota: Tomado y modificado de Porres (2003).

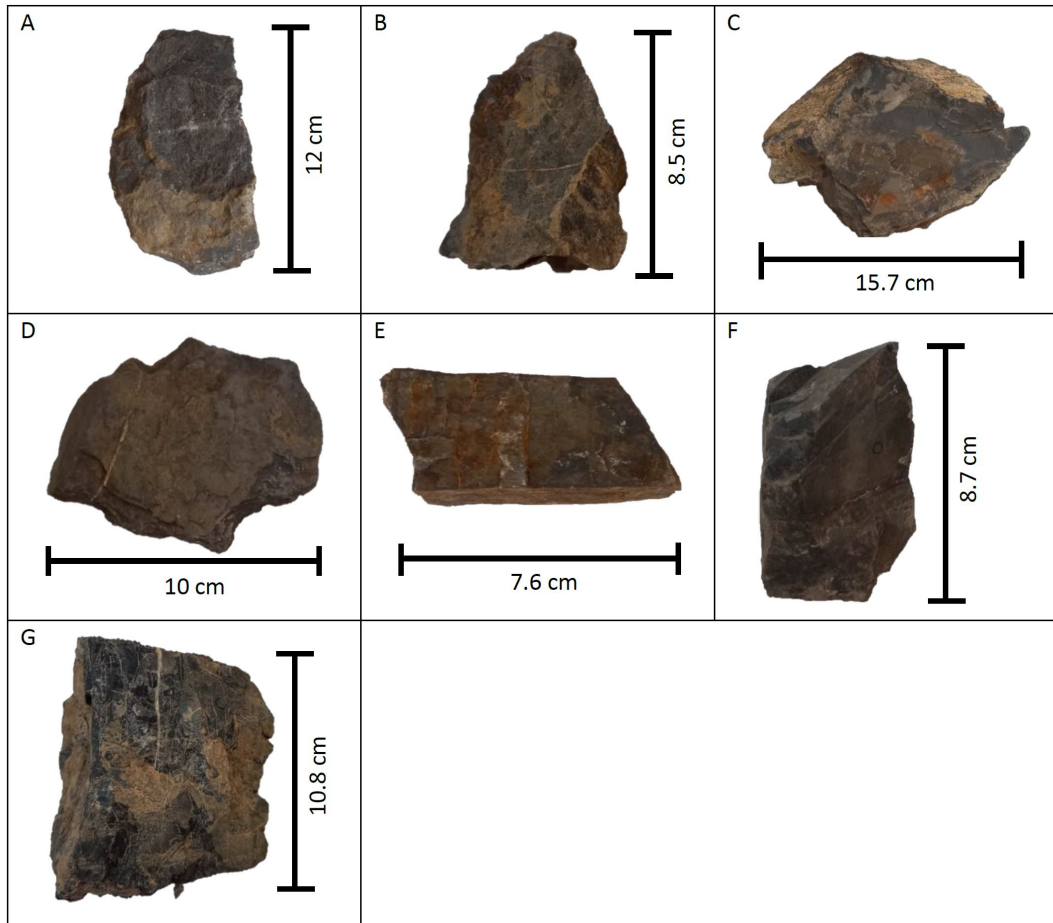
**Anexo 3.** Cuadro resumen de las estaciones tomadas en campo con su respectiva descripción.

Estación	Coordenadas		Formación	Muestra	Fotografía	Litología
	E	N				
PB-01	1149820	1234772	Depósito Cuaternario	-	FPB-01	Coluvión
PB-02	1150032	1234716	Tibú-Mercedes	MPB-01	FPB-02, FPB-02C, FPB-28	Calizas con algunas intercalaciones lodosas
PB-03	1150020	1234609	Tibú-Mercedes	MPB-01	FPB-02, FPB-28	Calizas con algunas intercalaciones lodosas
PB-04	1150121	1234488	Tibú-Mercedes	MPB-02	FPB-29	Caliza
PB-05	1150159	1234428	Tibú-Mercedes	MPB-03	FPB-30	Calizas hacia el techo y lodolitas hacia la base
PB-06	1150159	1234421	Tibú-Mercedes	MPB-04	FPB-03, FPB-31	Lodolitas calcáreas
PB-07	1150184	1233960	Tibú-Mercedes	-	FPB-04	Calizas
PB-08	1151098	1233860	Depósito Cuaternario	-	FPB-05	Coluvión
PB-09	1151102	1233862	Depósito Cuaternario	-	FPB-05	Coluvión
PB-10	1150318	1233529	Tibú-Mercedes	MPB-05	FPB-06, FPB-32	Lodolita
PB-11	1150308	1233508	Tibú-Mercedes	MPB-05	FPB-07, FPB-32	Caliza
PB-12	1150985	1236256	Contacto Tibú-Mercedes y Rionegro	MPB-06, MPB-07	FPB-08, FPB-09, FPB-10, FPB-11, FPB-12, FPB-13, FPB-14, FPB-33, FPB-34	Lodolitas y lodolitas calcáreas
PB-13	1151143	1236801	Rionegro	MPB-08, MPB-09	FPB-15, FPB-16, FPB-17, FPB-35, FPB-36	Cuarzoarenitas y lodolitas a la base
PB-14	1151086	1237466	Rionegro	MPB-10	FPB-18, FPB-37	Intercalaciones de cuarzoarenita y lodolita
PB-15	1151129	1236770	Rionegro	MPB-17, MP18	FPB-19, FPB-44, FPB-45	

**Anexo 4.** Capas de caliza de la Fm Tibú-Mercedes con estratificación plano-paralela, bioturbadas y bastante fracturadas en dirección vertical. Fotografía FPB-04.


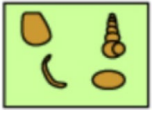

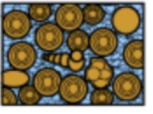
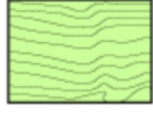


**Anexo 5.** Muestras de mano de la Fm Tibú-Mercedes con su descripción. Fotografías de la FPB-28 a la FPB.34.



MUESTRA	DESCRIPCIÓN
A. Muestra MPB-01	Caliza de color gris oscuro que pasa a pardo por la meteorización, lodosoportada de tipo wackestone (según la clasificación de Dunham, 1962), de matriz calcárea, con rellenos de calcita en pequeñas fracturas y patinas de oxidación de color ocre. Se observa rasgos de bioturbación.
B. Muestra MPB-02	Caliza de color gris oscuro que pasa a pardo al meteorizarse, de matriz calcárea, lodosoportada de tipo wackestone (según la clasificación de Dunham, 1962), presencia de venillas de carbonato de calcio de 2 mm de ancho. Se observa la calcita de color lechoso y amarillento en los bordes de la muestra, en donde es visible su fractura concoidea.
C. Muestra MPB-03	Lodolita de color gris oscuro fisil de cemento silíceo con superficies de oxidación y de caolín de color amarillento, se fractura en laminas y presenta cuarzo cristalizado en las zonas de debilidad.
D. Muestra MPB-04	Lodolita calcárea de color gris oscuro con cemento calcáreo, se observa una vena de calcita que atraviesa la muestra y signos de bioturbación.
E. Muestra MPB-05	Lodolita de color gris oscuro de cemento silíceo con superficies de oxidación y cristalización del cuarzo.
F. Muestra MPB-06	lodolita de color gris oscuro con cemento calcáreo y presencia de venillas de calcita
G. Muestra MPB-07	lodolita de color gris oscuro con cemento calcáreo y presencia de venillas de calcita, exhibe un mayor grado de fracturamiento y por lo mismo mayor precipitación del carbonato de calcio en las fracturas.

**Anexo 6.** Cuadro de clasificación para rocas carbonatadas según Dunham (1962).

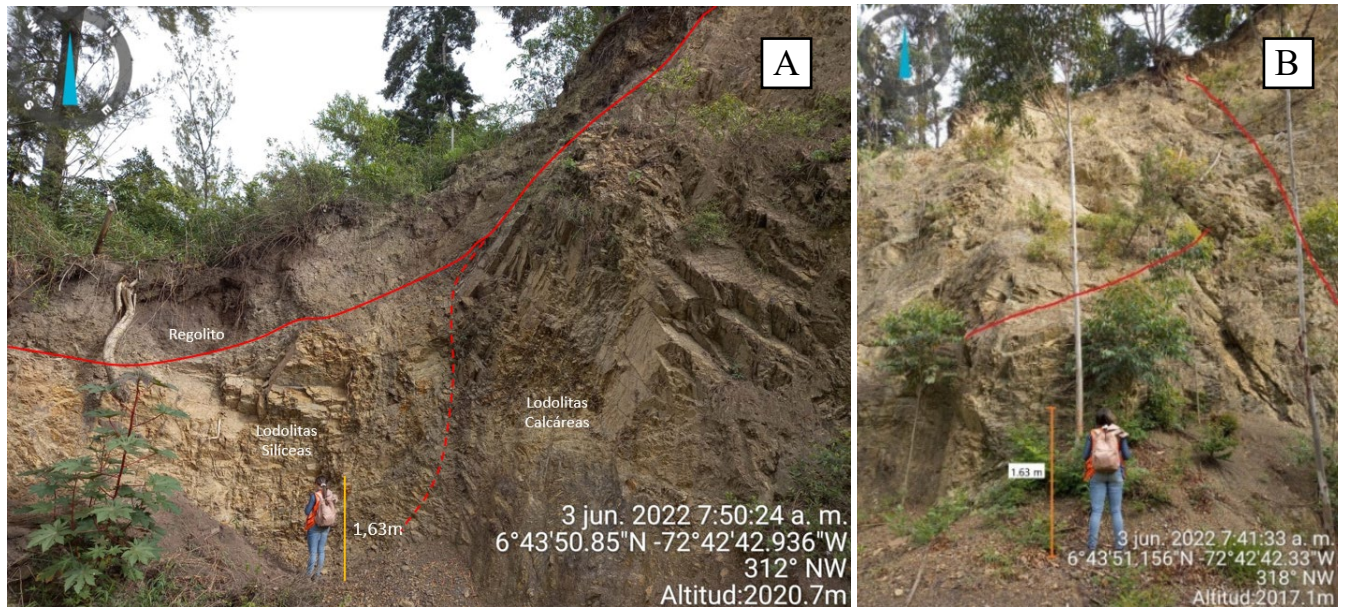
Componentes originales no unidos en la depositación				Componentes originales unidos en la depositación. Material esquelético intercrecido, laminación contraria a la gravedad, o cavidades cubiertas por sedimentos, cubiertas por material orgánico per demasiado grandes para ser intersticios
Lodosoportada		Granosoportada		
Menos de 10% de granos	Más del 10% de granos			
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone
				

Nota: Tomado de SEPM STRATA.

**Anexo 7.** Calizas de la Fm Tibú-Mercedes karstificadas.

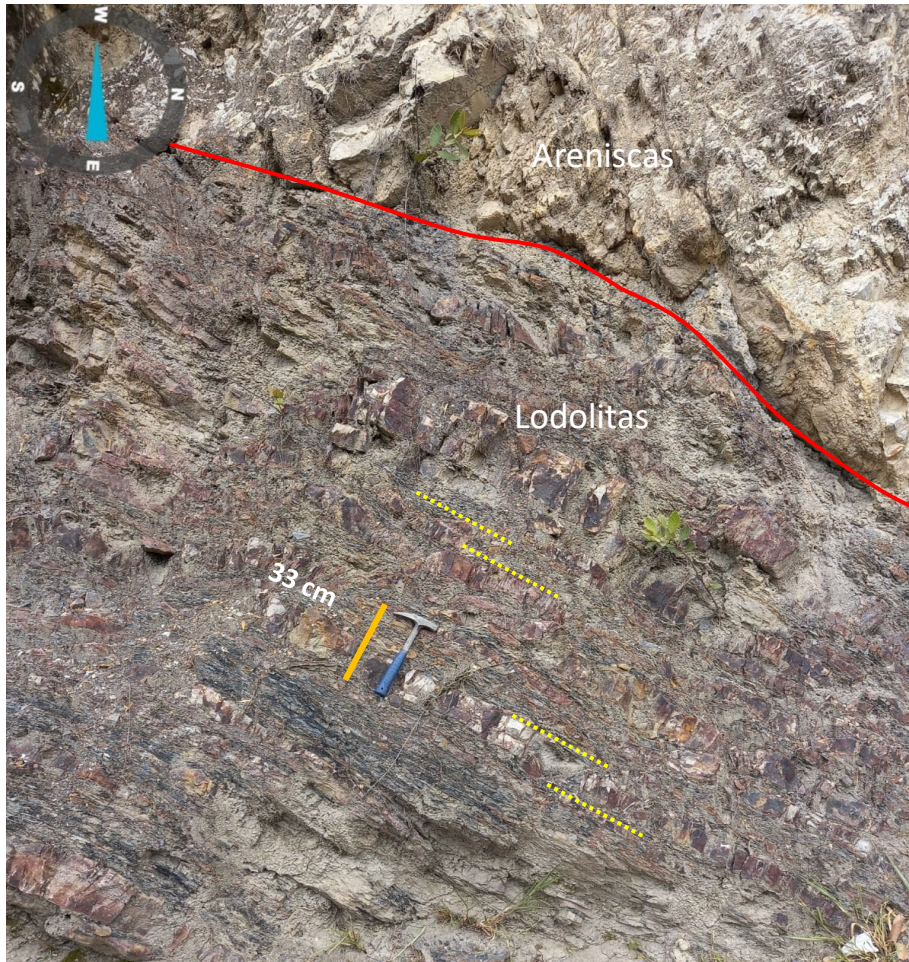


**Anexo 8.** (A). Contacto fallado entre la Formación Tibú-Mercedes la Formación Rionegro. (B). Fracturamiento, diaclasamiento y meteorización en las lodolitas. Fotografía FPB-14(A) y FPB-13.

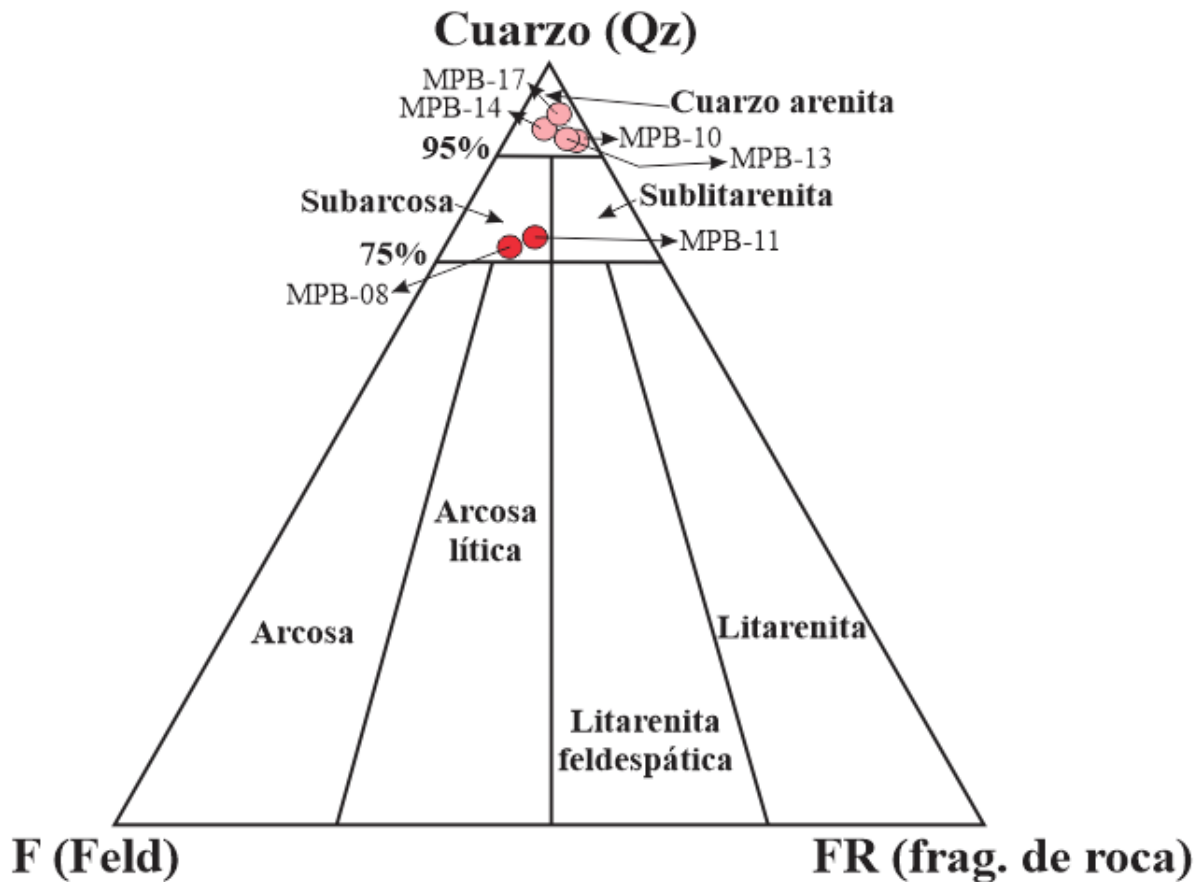


Nota: Obsérvese en la parte superior suelo residual y el buzamiento de las lodolitas calcáreas.

**Anexo 9.** Contacto entre areniscas y lodolitas siliciclásticas de la Formación Rionegro. Fotografía FPB-21.

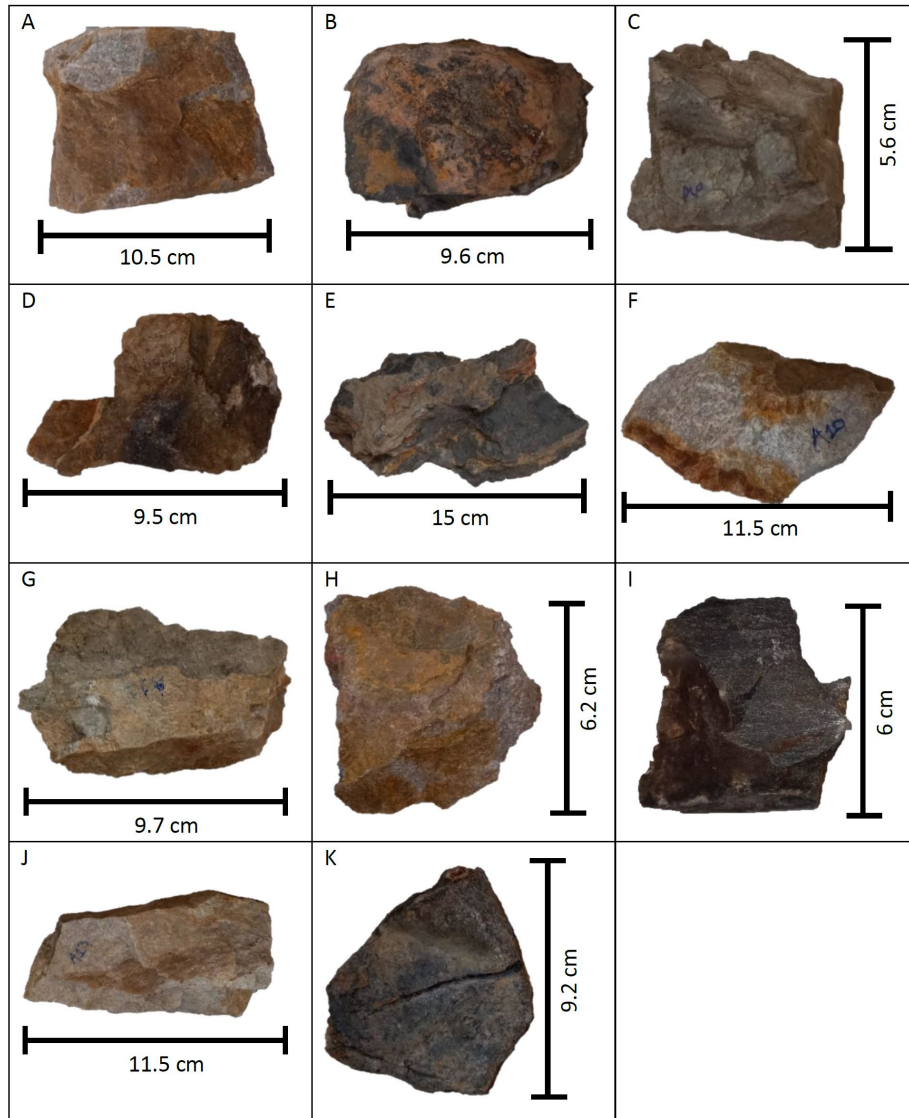


**Anexo 10.** Tipos de areniscas según su composición de las muestras recolectadas en la zona de estudio en el diagrama de Folk.



Nota: Los puntos de color rosado indican las muestras de arenisca clasificadas como cuarzoarenitas (MPB-10, MPB-13, MPB-14 y MPB-17) y los puntos de color rojo son las muestras clasificadas como subarcosas (MPB-08 y MPB-11).

Anexo 11. Muestras de mano de la Formación Rionegro (Kirn) con su descripción. Fotografías FPB-35 a la FPB-45.



MUESTRA	DESCRIPCIÓN
A. Muestra MPB-08	Arenisca de color gris claro, las zonas meteorizadas son de color pardo, su tamaño de grano es de medio a grueso con matriz fina, con cemento silíceo, sus granos son subredondeados a subangulares y subelongados, bien calibrados, compuesta mineralógicamente por aproximadamente un 78% de cuarzo y en menor cantidad feldespatos y micas, no se observan líticos. Debido a su composición se clasifica como una subarcosa (según Folk, 1974).
B. Muestra MPB-09	Lodolita de color gris oscuro que cambia a pardo en sus partes meteorizadas, de cemento silíceo con presencia de óxidos y micas.
C. Muestra MPB-10	Arenisca de color gris medio de grano grueso, redondeado y subsférico, bien calibrado, con cemento silíceo, compuesta mineralógicamente por aproximadamente un 97% de cuarzo y en menor proporción feldespatos y plagioclasa; el cuarzo exhibe su fractura concoidea y su brillo vítreo característico, la roca presenta un grado de fracturación medio, y debido a su composición se clasifica como una cuarzoarenita (según Folk, 1974)
D. Muestra MPB-11	Similar a la muestra MPB-08 con mayor proporción de micas y presencia de óxidos.
E. Muestra MPB-12	Lodolita de color gris oscuro, muy fisil, brillo vítreo y cemento silíceo.
F. Muestra MPB-13	Arenisca de color gris claro de grano grueso, subredondeado y subsférico, bien calibrado, con cemento silíceo, compuesta mineralógicamente por aproximadamente un 96% de cuarzo y en menor proporción feldespatos y micas de color gris oscuro; el cuarzo exhibe su fractura concoidea y su brillo vítreo característico, la roca presenta un grado de fracturación medio y patinas de oxidación, y debido a su composición se clasifica como una cuarzoarenita (según Folk, 1974).
G. Muestra MPB-14	Similar a la muestra MPB-10 con presencia de alteración a sericita, cristales de cuarzo dentro de las fracturas y venas del mismo mineral.
H. Muestra MPB-15	Similar a la muestra MPB-13.
I. Muestra MPB-16	Lodolita de color gris oscuro con laminación y presencia de micas y patinas de oxidación.
J. Muestra MPB-17	Similar a la muestra MPB-13 pero con una mayor proporción de cuarzo, su color es más claro y no presenta patinas de oxidación.
K. Muestra MPB-18	Lodolita de color gris oscuro con presencia de micas y óxidos de hierro.

**Anexo 12.** Datos tomados para construir la poligonal.

$D_i$	$D_f$	Coordenadas		Distancia (m)	Dirección	Dato Estructural	Observaciones	Muestra	Fotografía
		E	N						
$D_0$	$D_1$	1151086	1237466	9.66	8°	165/29	Lodolitas a la base, seguidas de areniscas	MPB-10	FPB-20, FPB-37
$D_1$	$D_2$	1151094	1237438	26.2	356°	247/34	Intercalaciones de areniscas y lodolitas	MPB-11	FPB-21, FPB-38
$D_2$	$D_3$	1151089	1237429	46	2°	-	Intercalaciones de areniscas y lodolitas, muy deformadas. No se tomó dato estructural.	MPB-12	FPB-22, FPB-39
$D_3$	$D_4$	1151100	1237383	50	6°	-	Coluvión	-	
$D_4$	$D_5$	1151105	1237332	50	353°	-	Coluvión	-	
$D_5$	$D_6$	1151120	1237278	35.1	26°	-	Coluvión	-	
$D_6$	$D_7$	1151134	1237250	24.8	345°	-	Coluvión	-	FPB-23, FPB-24
$D_7$	$D_8$	1151136	1237225	100	356°	-	Coluvión	-	
$D_8$	$D_9$	1151134	1237131	200	352°	-	Coluvión	-	
$D_9$	$D_{10}$	1151145	1236942	120	353°	-	Coluvión	-	
$D_{10}$	$D_{11}$	1151146	1236836	24.5	352°	242/36	Intercalaciones de areniscas y lodolitas	MPB-13	FPB-25, FPB-40
$D_{11}$	$D_{12}$	1151141	1236821	33	340°	205/34	Areniscas con algunas intercalaciones de lodolitas hacia la base	MPB-14	FPB-26, FPB-41
$D_{12}$	$D_{13}$	1151146	1236781	23.7	322°	170/42	Intercalaciones de areniscas y lodolitas	MPB-15, MPB-16	FPB-27, FPB-42, FPB-43
$D_{13}$	$D_{14}$	1151129	1236770	24.7	306°	173/43	Areniscas hacia la base y lodolitas hacia el techo	MPB-17, MP18	FPB-19, FPB-44, FPB-45

**Anexo 13.** Tabla de las litologías que conforman el subsuelo de la zona de estudio con su respectivo espesor y resistividad, determinados en el apartado anterior.

MODELO SIN VARIACIÓN		
Litología	Espesor (m)	Resistividad (ohm*m)
Depósito	40	90
Calizas	210	340
Areniscas	130	280
Formación Girón	200	700

**Anexo 14.** Tablas de los modelos teóricos generados con variaciones en los valores de resistividad de las litologías que conforman el subsuelo de la zona de estudio.

<b>Modelo 1</b>		
<b>Litología</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega^*m</math>)</b>
Depósito saturado	40	14
Calizas fracturadas saturadas (Kitm)	210	80
Areniscas saturadas (Kirn)	130	50
Formación Girón (Jg)	200	300

<b>Modelo 3</b>		
<b>Litología</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega^*m</math>)</b>
Depósito seco	40	150
Calizas compactas secas (Kitm)	210	600
Areniscas no saturadas (Kirn)	130	300
Formación Girón (Jg)	200	1000

<b>Modelo 2</b>		
<b>Litología</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega^*m</math>)</b>
Depósito húmedo	40	30
Calizas fracturadas húmedas (Kitm)	210	300
Areniscas húmedas (Kirn)	130	120
Formación Girón (Jg)	200	500

<b>Modelo 3</b>		
<b>Litología</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega^*m</math>)</b>
Depósito seco	40	240
Calizas compactas secas (Kitm)	210	800
Areniscas no saturadas (Kirn)	130	500
Formación Girón (Jg)	200	1500

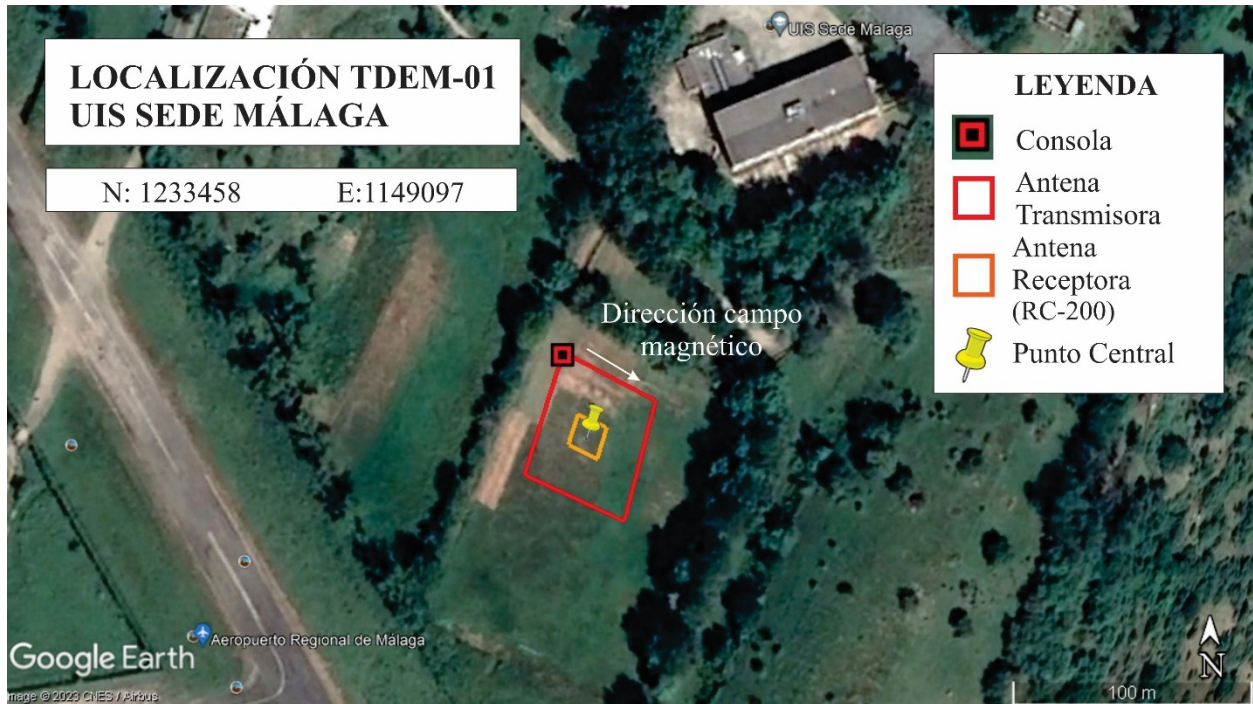
**Anexo 15.** Tablas de los modelos teóricos generados con variaciones en los valores de espesor de las litologías que conforman el subsuelo de la zona de estudio con su respectiva resistividad que representan diferentes escenarios posibles durante la adquisición.

<b>Modelo 1</b>		
<b>Litología</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega \cdot m</math>)</b>
Depósito	30	90
Calizas (Kitm)	270	340
Areniscas (Kirn)	150	280
Formación Girón (Jg)	130	700

<b>Modelo 2</b>		
<b>Litología</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega \cdot m</math>)</b>
Depósito	60	90
Calizas (Kitm)	150	340
Lodolitas (Kirn)	70	70
Areniscas (Kirn)	80	280
Formación Girón (Jg)	220	700

<b>Modelo 3</b>		
<b>Litología</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega \cdot m</math>)</b>
Depósito saturado	40	15
Caliza fracturada húmeda (Kitm)	120	250
Caliza fracturada Saturada (Kitm)	100	170
Areniscas húmedas (Kirn)	110	100
Areniscas no saturadas (Kirn)	80	300
Formación Girón (Jg)	130	700

<b>Modelo 4</b>		
<b>Litología</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega \cdot m</math>)</b>
Depósito seco	40	170
Caliza compacta seca (Kitm)	160	700
Lodolitas no saturadas (Kirn)	40	100
Areniscas no saturadas (Kirn)	140	300
Formación Girón (Jg)	200	700

**Anexo 16.** Localización TDEM-01.

El TDEM-01 se realizó en la cancha de fútbol de la UIS Sede Málaga, cuyo material era césped; en el lugar se encuentran estructuras o materiales que interfirieron con la medición y generaron ruido, el arco norte estaba situado a 6 m de la antena transmisora, mientras el arco sur a 60 m, había una cerca metálica a 20 m al NE y una al NW a 17 m, a estas distancias se encontraban postes de luz con sus correspondientes transformadores. En esta localización se realizaron 2 sondeos.

**Anexo 17.** Localización TDEM-03.

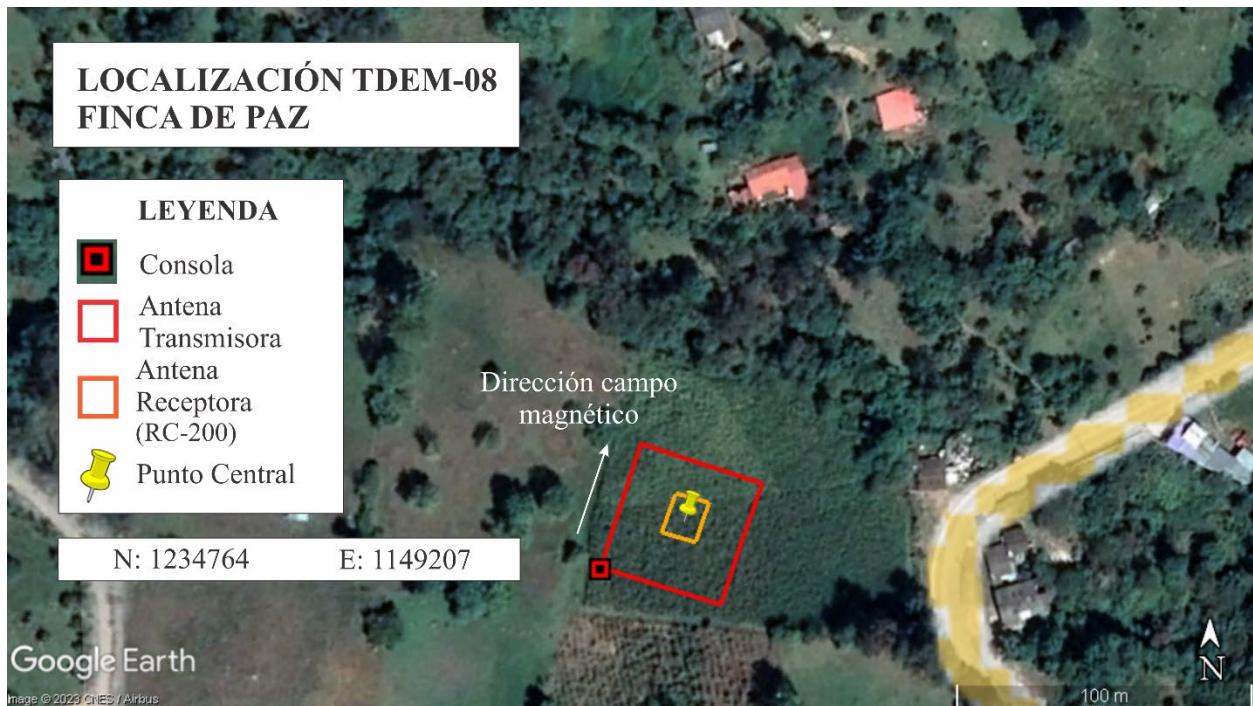
Al igual que el TDEM-02 fue tomado en la Vereda Buenavista, la topografía tiene cierto grado de inclinación y pastos de 10-20 cm. El lugar está dividido por una cerca eléctrica que impedía el montaje del equipo, por lo que se suspendió el paso de corriente y se optó por retirarla del lugar durante el tiempo de la medición. Se encuentran situados postes de luz de baja tensión al NW y, cercas metálicas al SEE y NNE a 25 m y 44 m respectivamente. En el lugar se realizaron 3 mediciones.

**Anexo 18.** Localización TDEM-06.

El TDEM-06 se encuentra también en la Vereda El Barzal, la superficie estaba cubierta por un pasto que alcanza los 40-50 cm de alto, lo que dificultó un poco el montaje del arreglo, ya que las antenas deben tocar lo mejor posible el suelo. El terreno lo limitan cercas eléctricas, cuyo paso de corriente fue suspendido, la cerca al SE queda a 20 m de la antena transmisora, la de dirección SW a 11 m, la del NNE 12 m y la que queda hacia el W a 10 m. En el lugar se realizaron 3 mediciones.

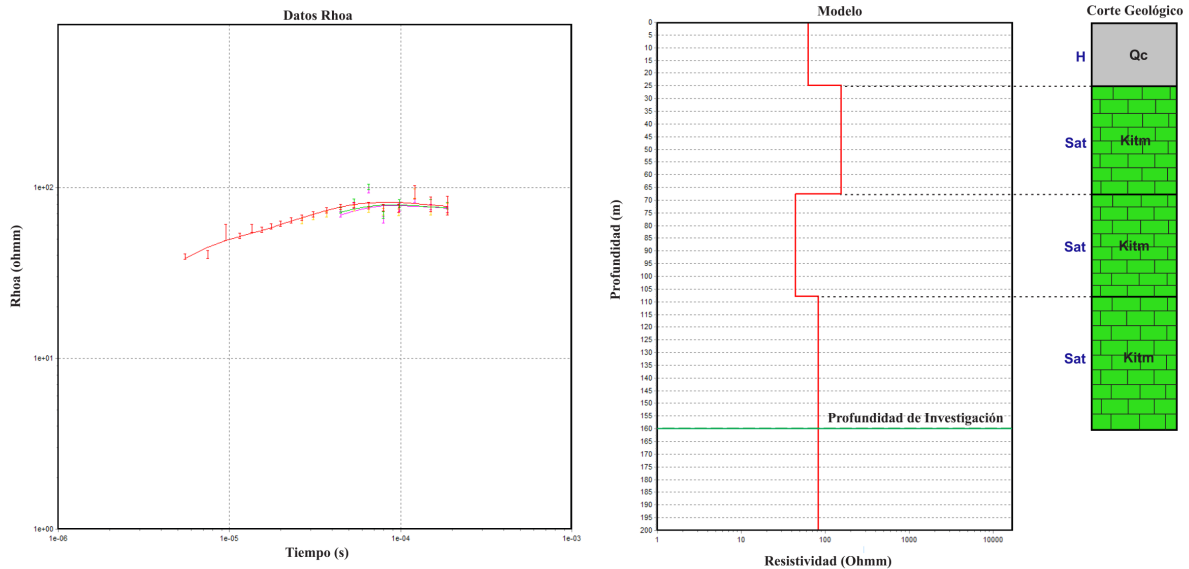
**Anexo 19.** Localización TDEM-07.

El TDEM-07 queda ubicado en el Sector La Ceba en la parte alta de la Vereda El Barzal, el terreno presentaba un pasto bajo, lo que facilitaba el montaje del arreglo, no había cercas metálicas o eléctricas cerca, pero sí unos cables de luz que pasaban a más de 20 m de alto. En el lugar se realizaron 3 mediciones.

**Anexo 20.** Localización TDEM-08.

El TDEM-08 está situado en la periferia del casco urbano del municipio, específicamente en la Finca De Paz, el terreno presentaba un pasto bajo; llovió mientras se estaba terminando de hacer el montaje del arreglo. La cerca metálica con dirección NWW se encontraba a 11 m de la consola y la cerca metálica al S a 12 m. En el lugar se realizaron 3 mediciones.

Anexo 21. Procesamiento e Interpretación TDEM-03.



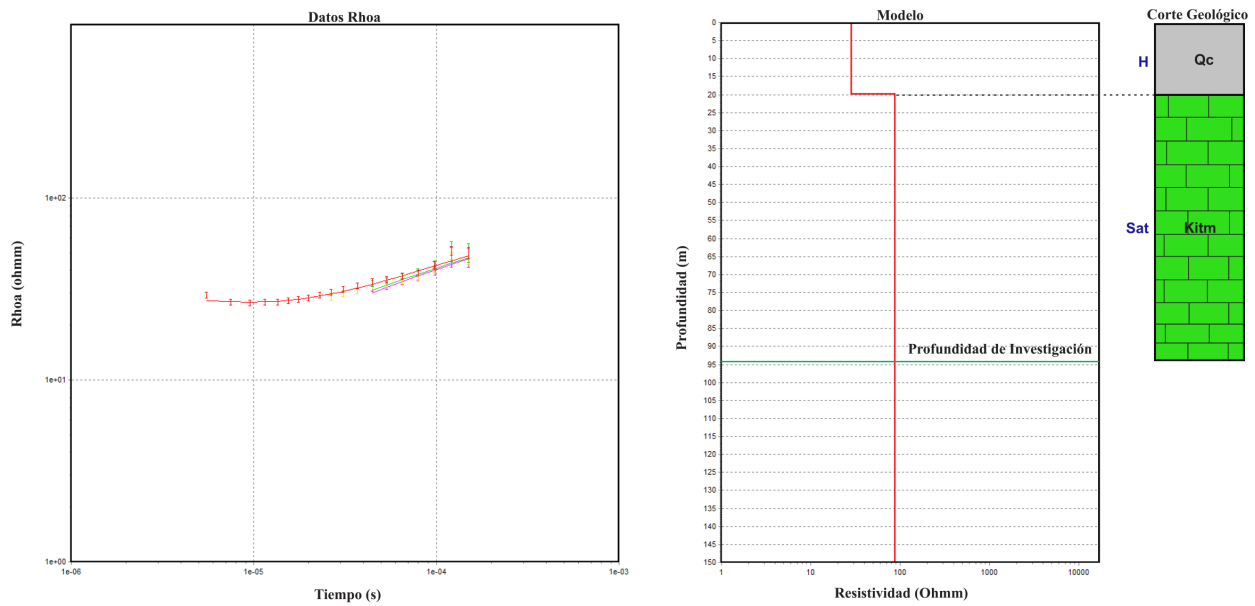
No. Capa	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología
1	63	24.9	24.9	Depósito coluvial húmedo
2	155	42.8	67.7	Caliza biomicrítica fracturada y saturada
3	44.4	40.3	108	Caliza biomicrítica densamente fracturada y saturada
4	83.3	-	-	Caliza biomicrítica fracturada y saturada

Generalidades	
E	1147473
N	1232614
No. Capas	4
Data Residual	2.1
Profundidad de Investigación (DOI)	160 m
Datos Usados	51
Datos Totales	136

Leyenda	
S:	Seco
H:	Húmedo
Sat:	Saturado
Qc	Depósito Coluvial
Kitm	Fm Tibú-Mercedes
Kirm	Fm Rionegro

Esta medición se realizó con el script Dual\_moment\_39\_gates y tuvo una duración de 40 minutos, este sondeo alcanzó una DOI de 160 m. Se generó un perfil compuesto por 4 capas con una data residual (error) de 2.1. Al realizar el corte geológico se interpretó que la capa más superficial está constituida por un depósito coluvial húmedo con un espesor de 24.9 m y una resistividad eléctrica promedio de 63  $\Omega m$ , a esta le infrayace una capa de caliza biomicrítica fracturada y saturada con un espesor de 42.8 m y una resistividad promedio de 155  $\Omega m$ , seguida de una capa de caliza con mayor densidad de fracturación y saturada con un espesor de 40.3 m y una resistividad promedio de 44.4  $\Omega m$ , por último en la parte inferior se tiene una capa de caliza biomicrítica fracturada y saturada cuyo espesor es desconocido y su resistividad promedio es de 83.3  $\Omega m$ .

**Anexo 22.** Procesamiento e Interpretación TDEM-06.



No. Capa	Resistividad ( $\Omega^m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología
1	28.6	19.9	19.9	Depósito coluvial húmedo
2	88.6	-	-	Caliza biomicrítica fracturada y saturada

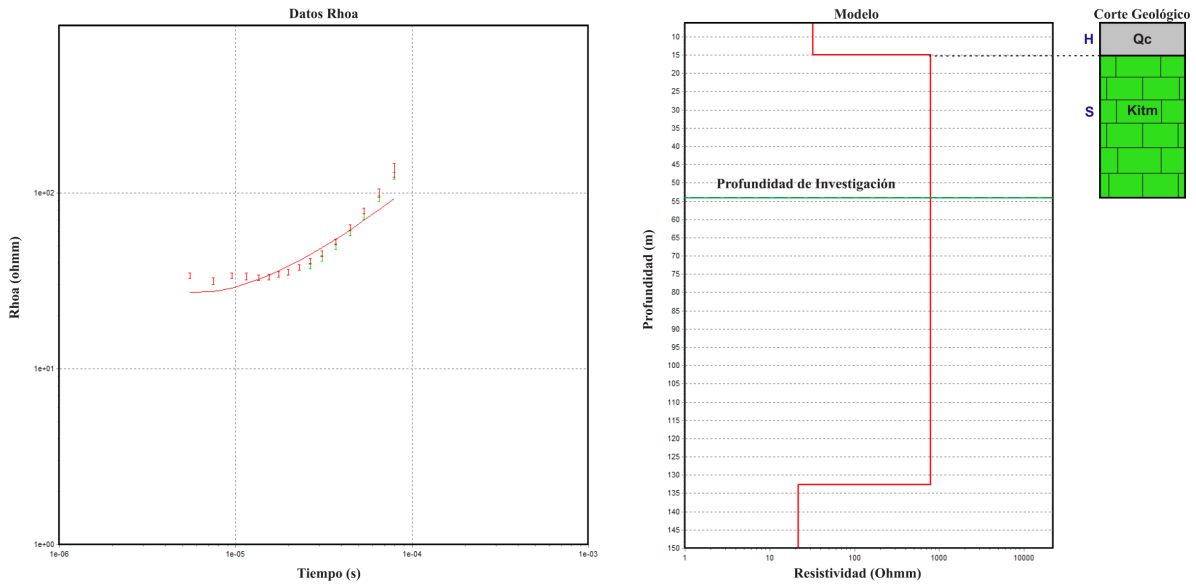
Generalidades	
E	1150240
N	1231891
No. Capas	2
Data Residual	1.2
Profundidad de Investigación (DOI)	94 m
Datos Usados	49
Datos Totales	136

Leyenda	
S: Seco	
H: Húmedo	
Sat: Saturado	
Qc	Depósito Coluvial
K1rn	Fm Tibú-Mercedes
K1rn	Fm Rionegro

Esta medición se realizó con el script Dual\_moment\_39\_gates y tuvo una duración de 40 minutos, este sondeo alcanzó una DOI de 94 m.

Se generó un perfil compuesto por 2 capas con un data residual (error) de 1.2. Al realizar el corte geológico se interpretó que la capa superficial está constituida por un depósito coluvial húmedo con un espesor de 19.9 m y una resistividad eléctrica promedio de 28.6  $\Omega m$ , a esta le infrayace una capa de caliza biomicrítica fracturada y saturada de la Fm Tibú-Mercedes cuyo espesor es desconocido y su resistividad promedio es de 88.6  $\Omega m$ .

**Anexo 23.** Procesamiento e Interpretación TDEM-07.



No. Capa	Resistividad ( $\Omega^2m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología
1	32.3	15	15	Depósito coluvial húmedo
2	796	118	133	Caliza micrítica compacta y seca
3	21.8	-	-	-

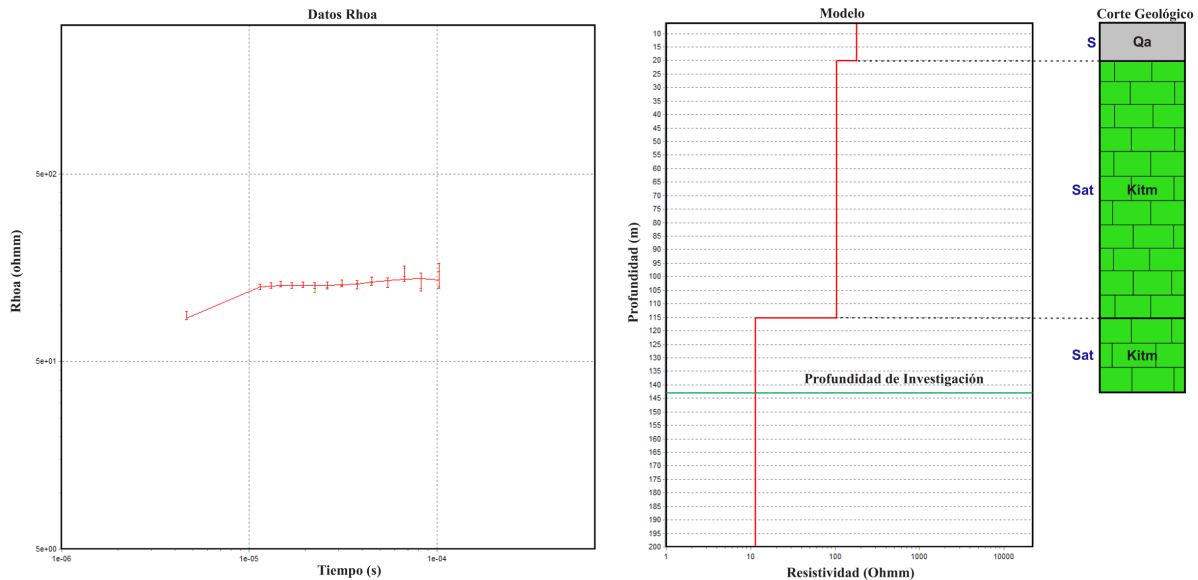
Generalidades	
E	1149828
N	1233662
No. Capas	3
Data Residual	3.4
Profundidad de Investigación (DOI)	54 m
Datos Usados	33
Datos Totales	136

Leyenda	
S: Seco	
H: Húmedo	
Sat: Saturado	
Qc	Depósito Coluvial
Kitm	Fm Tibú-Mercedes
Kirm	Fm Rionegro

Esta medición se realizó con el script Dual\_moment\_39\_gates y tuvo una duración de 40 minutos, este sondeo alcanzó una DOI de 54 m.

Se generó un perfil compuesto por 3 capas con un data residual (error) de 3.4. Al realizar el corte geológico se interpretó que la capa más superficial está constituida por un depósito coluvial húmedo con un espesor de 15 m y una resistividad eléctrica promedio de 32.3  $\Omega m$ , a esta le infrayace una capa de caliza micrítica compacta y seca de la Fm Tibú-Mercedes con un espesor de 118 m y una resistividad promedio de 796  $\Omega m$ , por último, en la parte inferior se tiene una capa de espesor desconocido y resistividad promedio de 21.8  $\Omega m$ , no se realizó una asignación de litología ya que no se encuentra dentro del DOI por lo que su confiabilidad es baja.

Anexo 24. Procesamiento e Interpretación TDEM-08.



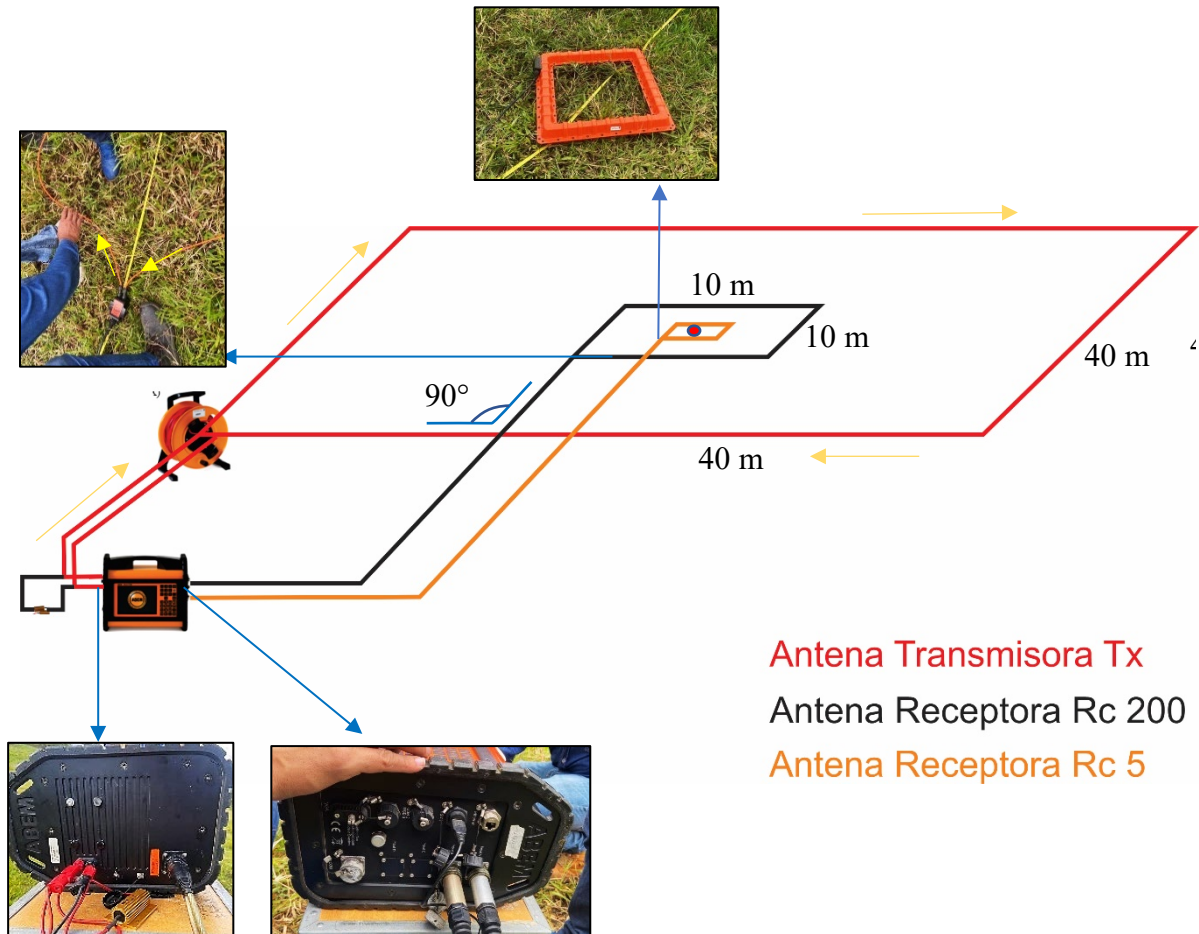
No. Capa	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología
1	181	20.1	20.1	Depósito aluvial seco
2	104	95.1	115.1	Caliza biomicrítica fracturada y saturada
3	11.4	-	-	Caliza biomicrítica densamente fracturada y saturada

Generalidades	
E	1149207
N	1234764
No. Capas	3
Data Residual	0.6
Profundidad de Investigación (DOI)	143 m
Datos Usados	32
Datos Totales	136

Leyenda	
S: Seco	
H: Húmedo	
Sat: Saturado	
Qa	Depósito Aluvial
Kitm	Fm Tibú-Mercedes
Kirn	Fm Rionegro

Esta medición se realizó con el script Dual\_moment\_39\_gates y tuvo una duración de 40 minutos, este sondeo alcanzó una DOI de 143 m.

Se generó un perfil compuesto por 3 capas con un data residual (error) de 0.6. Al realizar el corte geológico se interpretó que la capa más superficial está constituida por un depósito aluvial seco con un espesor de 20.1 m y una resistividad eléctrica promedio de 181  $\Omega m$ , a esta le infrayace una capa de caliza biomicrítica fracturada y saturada con un espesor de 95.1 m y una resistividad promedio de 104  $\Omega m$ , por último, en la parte inferior se tiene una capa de caliza biomicrítica con una alta densidad de fracturas y saturada de espesor desconocido y resistividad promedio de 11.4  $\Omega m$ . Las calizas corresponden a la Fm Tibú-Mercedes.

**Anexo 25.** Disposición del arreglo para la Adquisición TDEM.

**Anexo 26.** Sumidero localizado cerca a la pista del Aeropuerto, producido por los procesos de karstificación, asociados a las calizas de la Formación Tibú-Mercedes.



**Anexo 27.** Tabla de coordenadas de los sondeos TDEM.

Adquisición	Coordenada	Coordenada	Localización
	N	E	
TDEM-01	1233458	1149097	Sede UIS Málaga
TDEM-02	1232780	1146462	Vereda Buenavista
TDEM-03	1232614	1147473	Vereda Buenavista
TDEM-04	1233150	1149146	Aeropuerto de Málaga
TDEM-05	1233072	1150574	Vereda el Barzal
TDEM-06	1231891	1150240	Vereda el Guásimo
TDEM-07	1233662	1149828	Vereda el Barzal
TDEM-08	1234764	1149207	Finca de Paz
TDEM-09	1234299	1148935	Finca Tajamara
TDEM-10	1232851	1148206	Detrás del Estadio – Casco urbano